

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

ÉTUDE PAR SIMULATION
DE LA PARTIE CONSTANTE
D'UNE MACHINE À PAPIER DÉCOR

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCE DES PÂTES ET PAPIERS

PAR
MARTIN VALOIS

DÉCEMBRE 2001

2089

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

Avant-propos

Depuis notre tendre enfance nous simulons. Enfant, nous simulions par des jeux de rôle des situations que nous pourrions vivre en tant qu'adulte. Les simulations passaient du réaliste au fantastique.

Ces simulations ont évolué grâce à la venue de l'informatique. Aujourd'hui, jeunes et moins jeunes simulent derrière leur écran, des courses de formule un et de moto, des vols d'avion et d'hélicoptère, des événements historiques et civiques, et différents jeux de rôle.

La simulation est plus qu'un jeu, dans l'industrie c'est une méthode de mesure et une étude consistant à remplacer le procédé par un modèle plus simple, mais ayant un comportement semblable. Une fois la simulation satisfaisante, par exemple une fois que certaines données opérationnelles réelles puissent être reproduites par simulation, on peut identifier des paramètres les plus influents, prédire des problèmes potentiels sous certaines conditions d'opération, ainsi qu'optimiser des paramètres opérationnels pour minimiser ou maximiser certaines variables. On peut même se servir de la simulation pour la conception d'équipement et éventuellement pour la conception d'une usine.

Remerciements

Au cours des deux années passées à la réalisation de ma maîtrise en pâte et papier, j'ai eu la chance de côtoyer des gens qui m'ont aidés à améliorer mes compétences professionnelles.

Tout d'abord, je suis très reconnaissant envers le Docteur Luc Laperrière, mon directeur, qui a su m'appuyer et me diriger.

Je remercie CDM Papier Décor pour leur accueil, en particulier messieurs Jean-Pierre Hamel, directeur de l'ingénierie, et Alain Comtois, technicien de procédé, pour leurs précieux conseils.

Résumé

Pour avoir une bonne connaissance de leur procédé, les papetières ont recours à des outils informatiques, tels les simulateurs. Qu'il s'agisse d'optimisation du procédé de fabrication ou de minimisation des coûts de production, la simulation vient appuyer la prise de décisions dans les usines, comme chez CDM.

Pendant les changements de grade, des corrections à la pigmentation (couleur) sont toujours nécessaires avant d'obtenir une bonne production de papier occasionnant ainsi des pertes de temps et d'argent. La durée de ces corrections peut varier selon les changements de grade. CDM fait l'ajustement de la couleur avec une feuille pleine largeur (petite trime). L'objectif de ce travail était d'évaluer la possibilité d'effectuer ces correctifs avec une feuille beaucoup moins large (grande trime) pour diminuer la production de papier ne rencontrant pas les spécifications du client.

Deux scénarios ont été étudiés lors d'un changement de grade avec une feuille moins large, en utilisant une simulation dynamique sur CADSIM pour le calcul des bilans massiques. La variable qui a été analysée est le taux de cendres dans le papier car il peut être relié, en quelque sorte, à la couleur. Les scénarios comprennent un déplacement d'une ligne dans le système et une augmentation de la rétention. Dans le premier scénario, la pâte récupérée de l'eau blanche est envoyée directement au silo dans le but de récupérer plus rapidement la pâte sur la machine à papier. Normalement cette pâte retourne dans le cuvier-machine. Dans le deuxième scénario, la rétention des fibres et du titane sur la toile de formation a été augmentée. Si la rétention augmente,

Une première simulation du procédé actuel nous informe qu'un changement de grade peut se faire avec une trime large sans perdre la couleur. Pour valider la simulation avec le procédé réel, i.e. reproduire la perte de couleur lors d'un changement de grade, il était important d'établir une autre hypothèse: supposer des pertes supplémentaires de titane dans le

procédé. Tout en gardant le procédé actuel et en augmentant les pertes de titane, le temps (temps alloué) pour faire un changement de grade sans perdre la couleur a chuté. Cette hypothèse nous ramène plus près de la réalité.

Après la réévaluation des pertes de titane, le premier scénario a été comparé avec le procédé actuel. Il n'est pas recommandé de faire un changement dans la tuyauterie car dans la situation actuelle la diminution du taux de cendres est moindre. Donc le temps alloué est plus long dans la situation actuelle.

Le scénario portant sur l'augmentation de la rétention a été également comparé avec le procédé actuel. Si la rétention augmente, il y a moins de pâte fraîche à l'alimentation et moins de pertes de titane et le temps alloué augmente. Mais les coûts qu'impliquent un programme de rétention versus le gain en temps alloué nous prouve une fois de plus qu'il n'y a pas lieu d'investir.

Suite aux recommandations évidentes de garder le procédé tel quel, il est suggéré à CDM de pousser plus loin l'analyse en trouvant d'autres paramètres qui pourraient être reliés à la couleur.

Mots Clés

Simulation , couleur , papier décor, bilan massique, partie constante, industrie, modélisation.

Table des Matières

Avant-propos	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Mots Clés	v
Table des Matières	vi
Liste des Figures.....	ix
Liste des Tableaux.....	x
Liste des Équations.....	xi
Chapitre 1 - Introduction.....	1
1.1 Fabrication du papier décor.....	1
1.1.1 Type de pâte	2
1.1.1.1 Critères de sélection	2
1.1.1.2 Espèces fibreuse.....	2
1.1.1.3 Préparation	3
1.2 Pigment.....	3
1.2.1 Définition.....	3
1.2.2 Principe de pigmentation.....	3
1.2.2.1 Effet de la stratification	3
1.2.2.2 Ajustement de la couleur en production	4
1.2.3 Pigments utilisés.....	4
1.2.3.1 Pigments blancs.....	5
1.2.3.2 Pigments colorés.....	5
1.2.4 Contrôle de la pigmentation.....	5

1.2.5	Recette de pigmentation.....	5
1.2.6	Facteurs influençant la pigmentation.....	6
1.2.7	Contrôle en production	6
1.3	Positionnement de la recherche.....	7
Chapitre 2 - Recherche Littéraire.....		8
2.1	Principe de base en simulation.....	8
2.2	Modélisation et simulation.....	9
2.3	Simulateurs statiques et dynamiques	10
2.4	Outils de simulation.....	11
2.5	Simulation dans le domaine des pâtes et papier.....	11
2.5.1	Approche modulaire.....	12
2.5.2	Équations simultanées.....	13
2.6	Application de la simulation dans le domaine des pâtes et papier.....	14
2.6.1	Machines à papier	14
2.6.1.1	Machine à papier double-toile.....	14
2.6.1.2	Bout humide.....	21
2.6.1.3	Analyse dynamique du bout humide.....	24
2.6.2	Fermeture des circuits.....	26
2.6.2.1	Recyclage des effluents et du biotraitement	27
2.6.2.2	Impact thermique.....	30
2.6.2.3	Stratégies de gestion de l'eau blanche.....	30
2.6.3	Autres exemples	31
2.6.3.1	Unité de désencrage.....	31
2.6.3.2	Prédiction de composés organiques volatiles.....	33
2.6.3.3	Écosystèmes industriels	33
Chapitre 3 - Méthodologie		36
3.1	Implication de CDM	36
3.2	Hypothèses	36
3.3	Étapes du projet	38

Chapitre 4 - Résultats.....	42
4.1 Dynamique d'un changement de grade.....	42
4.1.1 Simulation du procédé actuel.....	44
4.1.2 Évaluation des pertes	45
4.1.3 Scénario 1 : Pâte de l'eau blanche au sd.....	48
4.1.4 Scénario 2 : Augmentation de la rétention.....	48
Chapitre 5 - Conclusion.....	55
5.1 Recommandations.....	55
5.2 Couleur VS cendres.....	56
5.3 À retenir	56
Bibliographie.....	57

Liste des Figures

Figure 2.1	Modèle simplifié d'une machine à papier.....	9
Figure 2.2	Zone de formation d'une machine à papier double-toile.....	15
Figure 2.3	Diagramme d'écoulement de la machine double-toile.....	16
Figure 2.4	Données de drainage de BELOIT.....	17
Figure 2.5	Schéma simplifié d'un procédé papetier.....	22
Figure 2.6	Configuration de la modélisation des séparateurs.....	23
Figure 2.7	Schéma du bout humide d'une machine à papier.....	24
Figure 2.8	Implantation des stratégies de fermeture.....	28
Figure 2.9	Schéma simplifié d'une unité de désencrage.....	32
Figure 2.10	Schéma d'un écosystème industriel.....	35
Figure 3.1	Étapes d'une étude par simulation.....	41
Figure 4.1	Cendres et débit en fonction du temps.....	43
Figure 4.2	Simulation du procédé actuel.....	44
Figure 4.3	Évaluation des pertes	46
Figure 4.4	Diagramme d'écoulement évaluation des pertes.....	47
Figure 4.5	Scénario 1 : Pâte de l'eau blanche au silo.....	49
Figure 4.6	Diagramme d'écoulement pâte au silo	50
Figure 4.7	Scénario 2 : Augmentation de la rétention.....	51
Figure 4.8	Diagramme d'écoulement 70% de rétention.....	52
Figure 4.9	Diagramme d'écoulement 85%de rétention.....	53
Figure 4.10	Diagramme d'écoulement 100% de rétention.....	54

Liste des Tableaux

Tableau 2.1 Courants de la zone de formation.....	15
Tableau 2.2 Expérience et simulation d'une machine à papier double-toile.....	20
Tableau 4.1 Pertes totales en titane	46
Tableau 4.2 Pâte au silo	49
Tableau 4.3 Rétention.....	51

Liste des Équations

$Q3 = Q1 + Q2$	Équation 1 9
$Q3 = Q4 + Q5$	Équation 2 9
$Q5 = Q6 + Q7$	Équation 3 9
$Qf3 = Qf1 + Qf2$	Équation 4 10
$Qf3 = Qf4 + Qf5$	Équation 5 10
$Qf5 = Qf6 + Qf7$	Équation 6 10
$(Q3 - Q3f) = (Q1 - Q1f) - (Q2 - Q2f)$	Équation 7 10
$(Q3 - Q3f) = (Q4 - Q4f) - (Q5 - Q5f)$	Équation 8 10
$(Q5 - Q5f) = (Q6 - Q6f) - (Q7 - Q7f)$	Équation 9 10
$100 * (Qxf / Qx) = [x]$	Équation 10 ... 10
$100 * ((Qx - Qxf) / Qxf) = [y]$	Équation 11 ... 10
$R_{shoe}^f = 27.685 + 0.312B + 0.03I + 1.129Q_{peo}$	Équation 12 ... 14
$Dr_{shoe} = -1.416 R_{shoe}^t + 159.8$	Équation 13 ... 14
$Dr_{sb} = 100(W_{ww3}/W_{p1})$	Équation 14 ... 16
$Dr_{srlt} = 100(W_{ww4}/W_{p1})$	Équation 15 ... 16
$Dr_{srlb} = 100(W_{ww5}/W_{p1})$	Équation 16 ... 16
$Dr_{sr2} = 100 (W_{ww6}/W_{p1})$	Équation 17 ... 16
$Dr_{sb} = 100(W_{ww3}/W_{M1})$	Équation 18 ... 18
$Dr_{srlt} = 100(W_{ww4}/W_{M2})$	Équation 19 ... 18
$Dr_{srlb} = 100(W_{ww5}/W_{M2})$	Équation 20 ... 18
$Dr_{sr2} = 100 (W_{ww6}/W_{M3})$	Équation 21 ... 18
$R_{sb}^f = 100(f_{M2}/f_{M1})$	Équation 22 ... 18
$100 - R_{srlt}^f = 100(f_{ww4}/f_{M2})$	Équation 23 ... 18

$100-R_{srlb}^f = (f_{ww5}/f_{M2})$	Équation 24... 18
$R_{sr2}^f = 100(f_{M4}/f_{M5})$	Équation 25... 18
$R_{element}^f = a R_{shoe}^f + b$	Équation 26... 19
$Dr_{element} = c R_{shoe}^t + d$	Équation 27... 21
$K_{Fibre} = 80$	Équation 28... 23
$K_{Fines} = 59 (Q_F)^{0.001}$	Équation 29... 23
$K_{Cendres} = 15 (Q_F)^{0.2}$	Équation 30... 23
$R = (R_f - R_F) Y_f + R_F$	Équation 31... 25

Chapitre 1 - Introduction

En 1991, CDM (compagnie de matériaux) Papiers Décors produisait son tout premier rouleau de papier commercial recouvert d'acrylate [1,2]. Ce fut la naissance du seul fabriquant de papier décor au Canada. L'usine de Drummondville est la seule qui est complètement intégrée dans le domaine du papier décor, produisant et transformant le papier pour les meubles de maison et l'équipement de bureau.

Recouvrant une surface de 25 000 mètres carrés, CDM est divisé en sections bien définies : la préparation des pâtes, la machine à papier, la finition, l'entreposage et les laboratoires.

La machine à papier a été conçue pour produire jusqu'à 25 000 tm/a à une vitesse de 400 m/min . La machine à papier ne peut opérer à pleine capacité dû aux nombreux changements de grade et à la variation du poids de base allant de 40 à 200 g/m². Malgré tout, c'est la plus grande machine à papier au monde dans la production de papier décor.

Une solution d'acrylate est appliquée sur le papier brut à l'aide de la technologie de l'EBC (electron beam curing). Ce procédé consiste à sécher la laque par un bombardement d'électrons. Le papier produit est le plus résistant.

L'imprégnation consiste à appliquer une solution de mélamine sur le papier. Le papier est séché à l'air chaud.

Pour CDM, le succès de la machine à papier ne dépend pas de la quantité produite mais plutôt de la valeur ajoutée.

1.1 Fabrication du papier décor

Le papier décor se fabrique à l'aide d'un mélange de pâtes commerciales fabriquées à partir d'essences résineuses et d'essences feuillues [3,4]. Après la remise en pâte dans le

tritrateur, le mélange de pâtes doit être raffiné afin d'améliorer la qualité du papier produit. La pâte est ensuite épurée et tamisée pour enlever les impuretés. Les additifs chimiques sont ajoutés à la pâte dans le cuvier machine. La pâte tamisée est alors alimentée sur la toile de formation. Les dispositifs d'égouttage retirent progressivement la plus grande partie de l'eau contenue dans la feuille. Après cette étape, le pressage permet de poursuivre l'extraction de l'eau dans la feuille avant la sécherie. Cette unité présente les étapes essentielles de la fabrication du papier à la partie humide de la machine, appelée partie constante.

1.1.1 Type de pâte

1.1.1.1 Critères de sélection

Pour produire un papier décor, les pâtes doivent posséder les caractéristiques suivantes : propreté, blancheur, résistance au vieillissement et à la traction. La pâte chimique blanchie est la seule pâte qui rencontre tous les critères de sélection. Le choix du type de pâte par CDM s'arrête sur le procédé Kraft. De plus, elles doivent permettre d'obtenir les propriétés suivantes dans le papier : porosité, rétention des pigments, formation, résistance à la traction, absorption

1.1.1.2 Espèces fibreuse

Il est nécessaire d'effectuer des mélanges d'espèces fibreuses où les avantages de l'une compensent les désavantages de l'autre. Les résineux produisent des fibres longues réputées pour la force physique qu'elles donnent aux papiers. Les feuillus produisent des fibres courtes qui permettent d'obtenir une rétention et une formation supérieures.

Pour la fabrication de papier décor, les fibres courtes représentent environ 70% de la portion du papier. La proportion de fibres longues dépend du grammage de papier : plus le grammage est bas, plus la feuille est faible ; il faut donc augmenter la quantité de fibres longues. Les proportions des fibres courtes et des fibres longues dépendent du grammage,

du niveau de cendres et du type de papier décor à produire. Chaque papier a sa recette fibreuse bien à elle. Ces recettes sont déterminées à l'avance, et, avec la formule de coloration, forment une combinaison qui permet de produire un papier qui rencontre les besoins du client.

1.1.1.3 Préparation

Les deux étapes principales de la préparation de la pâte sont la trituration, ou mise en pâte, et le raffinage. Les raffineurs doubles-disques sont utilisés dans une phase initiale, où les pâtes vierges sont séparées individuellement. Les raffineurs coniques sont utilisés sur le mélange de la pâte vierge, cassés, et pigments juste avant la caisse d'arrivée, offrant un contrôle sur la formation et le drainage.

1.2 Pigment

1.2.1 Définition

Les pigments sont des produits avec un pouvoir colorant et/ou opacifiant qui sont ajoutés à la pâte pour donner la coloration voulue au papier fini.

1.2.2 Principe de pigmentation

Le papier décor est un papier avec des exigences maximales d'exactitude et de qualité de couleur. La moindre différence de nuance d'un rouleau à un autre, rendra le papier brut inutilisable. La précision est extrêmement importante, car le client produit des stratifiés qui sont utilisés principalement pour la production de meubles à juxtaposer.

1.2.2.1 Effet de la stratification

Ce qui rend la production de papier décor encore plus difficile, c'est qu'une couleur identique de papier brut ne signifie pas nécessairement que le produit stratifié sera similaire. Ce phénomène est causé par le traitement donné au papier brut pour produire le stratifié.

Le papier brut est imprégné d'une résine qui a un indice de réfraction très près de celui des fibres. Le papier imprégné est ensuite appliqué sur une base de panneau-particule ou de support kraft, et la résine est plastifiée sous température et pression contrôlées. Cette stratification élimine l'air présente dans la feuille et les fibres deviennent « transparentes ». Seul un produit avec une indice de réfraction nettement supérieur à celui des fibres et de la résine pourra donner une opacité au produit fini. La répartition des pigments à l'intérieur de la feuille aura une influence sur l'apparence du stratifié. C'est ce qui explique pourquoi la couleur du papier, où on ne voit que la surface de la feuille, n'est pas indicative de la couleur du produit fini.

1.2.2.2 Ajustement de la couleur en production

L'effet de la stratification sur la couleur oblige donc CDM d'évaluer toute la production sous la forme de stratifiés qui sont ensuite comparés à des standards approuvés par le client. Lors de la fabrication d'une nouvelle couleur, un stratifié est préparé au laboratoire pour évaluer la couleur contre le standard du client. Il sera souvent nécessaire de faire plusieurs corrections à la pigmentation avant d'obtenir une bonne production du papier. Cette pratique occasionne des pertes de temps importantes, qui sont typiques de la production de ces papiers. Ces pertes sont très coûteuses en production de papier hors-norme pendant tout le processus d'ajustement de couleur.

1.2.3 Pigments utilisés

Les pigments utilisés sont essentiellement les mêmes que ceux utilisés dans l'industrie des peintures et des plastiques. Les pigments utilisés sont le TiO_2 et les glaises, appelés pigments blancs et les pigments colorés organiques et inorganiques. Le mélange de chacun des types dépend de la nuance et de l'opacité à obtenir pour reproduire le standard du client. Donc, chaque papier aura une recette bien à lui.

1.2.3.1 Pigments blancs

Le dioxyde de titane (TiO_2) est un solide cristallin incolore. Le caractère principal du TiO_2 est son indice de réfraction supérieur. Il sera donc le meilleur candidat pour donner l'opacité au stratifié. Les glaises ont un indice de réfraction bas. Le kaolin ne contribue pas à l'opacité dans le stratifié. Il est utilisé pour maintenir le niveau de pigments dans la feuille, afin de permettre une bonne absorption de résine lors de la transformation. Il est également possible d'utiliser d'autres pigments blancs, (i.e. le sulfate de barium) qui ont des blancheurs très élevées. Ces pigments ne contribuent pas à l'opacité, mais leur haut degré de blancheur n'affecte pas la coloration finale du produit. On les utilise uniquement pour la production de papier d'une blancheur extrême.

1.2.3.2 Pigments colorés

Lorsqu'il n'est pas possible d'obtenir la pigmentation voulue avec les oxydes de fer seulement, i.e. pour produire des couleurs vives, il est nécessaire d'utiliser des pigments organiques. Ce sont des colorants insolubles dans l'eau, qui sont surtout utilisés en surplus des oxydes de fer pour teinter le papier afin de reproduire le standard du client.

1.2.4 Contrôle de la pigmentation

Le niveau de pigments dans le papier décor peut varier de 20% à plus de 40%. Il est déterminé par le niveau de cendres dans la feuille, résidu après ignition à 600°C . Le montant de pigments à ajouter est déterminé par le pouvoir couvrant (opacité) et la coloration à obtenir.

1.2.5 Recette de pigmentation

Pour chaque nouveau papier, une recette sera pré-établie au laboratoire. À partir d'un échantillon du client, des pigments sont sélectionnés et des feuilles de laboratoire sont produites pour reproduire une couleur identique. Ce processus nous permet d'estimer les coûts de fabrication et de fournir un échantillon-témoin au client. Lorsque le client com-

mande le papier, il sera nécessaire d'adapter la recette du laboratoire en tenant compte des paramètres de production de la machine à papier. En production, il sera souvent nécessaire de faire quelques modifications à la recette pour obtenir un appareillage exact. La recette finale est tenue en inventaire, pour être utilisée lors des commandes subséquentes.

1.2.6 Facteurs influençant la pigmentation

Pour produire la couleur exactement, la recette peut varier d'une production à l'autre. Cette variation peut-être causée par la rétention, la formation, les matières premières, le grammage. Une attention particulière doit être consacrée à la rétention des pigments. Celle-ci est affectée par : la porosité du papier, le pH d'opération, la température, la quantité d'agent de rétention.

Une formation très uniforme est essentielle pour assurer une distribution fine et régulière des pigments. Les pigments utilisés font l'objet de vérifications intensives. Plus le grammage du papier est réduit, plus la quantité de pigments augmente pour reproduire le standard du client.

1.2.7 Contrôle en production

L'application des recettes de pigmentation pour la production de papier décor se fait via un système de dosage automatisé. L'addition de pigments est possible aux cuviers de mélange où l'on produit la recette initiale et aux cuviers pré-machine et machine où sont effectuées les corrections. L'addition de pigments est toujours proportionnelle à la quantité de fibres. L'addition initiale se fait toujours au cuvier mélange, où chaque ingrédient (fibres longues, courtes et cassés) est mesuré exactement. Par la suite, le cuvier de mélange est transféré au cuvier pré-machine. Pour vérifier la coloration, une portion du cuvier pré-machine est pompée au cuvier machine, puis à la machine à papier. Les corrections de couleur peuvent être effectuées selon la quantité de pâte qui reste dans le circuit de la machine. Une fois que la pigmentation exacte est déterminée, la recette initiale est modifiée pour la prochaine addition au cuvier de mélange.

1.3 Positionnement de la recherche

La fabrication de papier décor nécessite l'évaluation de chaque production sous forme de stratifiés. Des corrections à la pigmentation sont toujours nécessaires avant d'obtenir une bonne production de papier occasionnant ainsi des pertes de temps et d'argent. La durée de ces corrections peut varier selon les changements de grade.

L'ajustement de la couleur se fait avec une feuille pleine largeur (petite trime). L'objectif est d'évaluer la possibilité d'effectuer ces correctifs avec une feuille beaucoup moins large (grande trime) pour diminuer la production de papier ne rencontrant pas les spécifications du client. Cette façon de faire a déjà été envisagée par le passé. Des essais ont même été réalisés avec des feuilles juste assez larges pour être stratifiées. Le problème était que le taux de cendres (couleur) diminuait trop rapidement par rapport à une feuille pleine largeur, donnant beaucoup moins de temps pour faire un changement de grade (couleur). Le temps pour faire un changement de grade avec une feuille large est suffisant. L'idée est de voir l'évolution des cendres dans le temps avec une feuille moins large. La variation du taux de cendres doit être moins de 1% (valeur critique selon CDM) durant le changement de couleur. Toujours selon CDM, l'étude des changements de grade sur une période de 12 heures serait représentatif.

La solution idéale serait de pouvoir effectuer les correctifs de couleur avec seulement une bande de papier. Pour ce faire le recours de deux scénarios est envisagé. Dans un premier, l'effet d'un déplacement d'une ligne dans le procédé sera étudié. Ce changement permet de récupérer plus rapidement les fibres et les cendres sur la machine à papier. Dans un deuxième temps, un programme de rétention sera évalué. Ces deux scénarios pourraient augmenter la stabilité de la partie constante et permettraient de faire un changement de grade avec une feuille moins large sur une période de 12 heures sans dépasser la variation critique du taux de cendres.

Chapitre 2 - Recherche Littéraire

2.1 Principe de base en simulation

La simulation est l'imitation des opérations d'un procédé réel ou d'un système dans le temps. Elle est utilisée pour décrire et analyser le comportement d'un système, pour répondre au questionnement de son propos réel et pour le développement de nouveaux procédés [5].

L'avantage le plus important est de pouvoir, une fois le modèle validé, explorer de nouvelles procédures d'opération sans nuire à la production. De l'équipement aux paramètres d'opération, la simulation permet de tester chaque changement ou addition proposés dans le procédé, tout en laissant le procédé intact.

Avec la simulation, on trouve les réponses aux questions en isolant une partie du procédé où il est impossible d'avoir accès en réalité. On comprend mieux comment le système opère réellement plutôt que de se fier sur des prédictions des individus. On peut aussi étudier un phénomène qui se produit sur une période de 2 heures en seulement une minute et vice versa.

On oublie facilement que les engorgements sont un effet plutôt qu'une cause. En utilisant la simulation pour analyser les engorgements nous pouvons découvrir les délais dans le travail en cours, dans l'information, dans les matériaux ou dans d'autres procédés.

Un procédé est très complexe et il est impossible de considérer toutes les interactions qui prennent place dans un temps donné. La simulation permet donc de bien comprendre toutes ces interactions parmi les variables qui font qu'un procédé est si complexe.

Dans l'interprétation des résultats, il peut être difficile de déterminer si une observation est le résultat d'un système d'interrelations ou d'un système aléatoire.

Souvent, le modèle de simulation et ou l'analyse, sont insuffisants pour l'envergure de la problématique.

2.2 Modélisation et simulation

Pourquoi la modélisation ? Dans le domaine des pâtes et papier, on modélise pour simuler et optimiser les procédés. Les modèles développés sont statiques ou dynamiques, linéaires ou non linéaires, mono ou multivariables. Il est toujours possible d'écrire un logiciel pour chaque cas rencontré [6,7,8] mais la tendance est l'utilisation de logiciels généraux de simulation. C'est donc l'approche utilisée qui différencie les modèles [9]. Le développement d'un modèle peut se faire par une approche systématique en écrivant les relations entre les entrées et les sorties et en établissant les bilans entre des variables (débit, consistance, taux de cendres...). La figure 2.1 représente un modèle simplifié de l'unité opérationnelle d'une machine à papier.

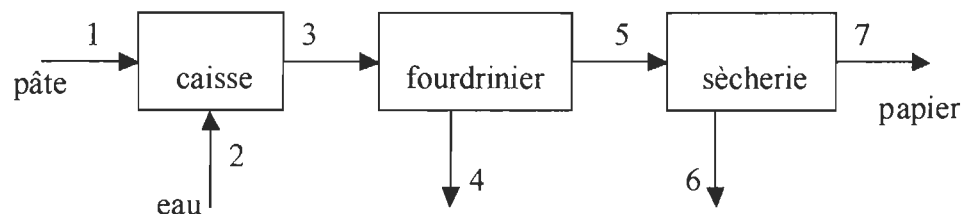


Figure 2.1 Modèle simplifié d'une machine à papier

Les équations de ce système sont :

Pour le débit total (Q) de la caisse d'arrivée, du fourdrinier et de la sècherie :

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 \quad \text{Équation 1}$$

$$Q_3 = Q_4 + Q_5 \quad \text{Équation 2}$$

$$Q5 = Q6 + Q7 \quad \text{Équation 3}$$

Pour le débit de fibre (Qf) de la caisse d'arrivée, du fourdrinier et de la sècherie :

$$Qf3 = Qf1 + Qf2 \quad \text{Équation 4}$$

$$Qf3 = Qf4 + Qf5 \quad \text{Équation 5}$$

$$Qf5 = Qf6 + Qf7 \quad \text{Équation 6}$$

Pour le débit de cendres de la caisse d'arrivée, du fourdrinier et de la sècherie :

$$(Q3 - Q3f) = (Q1 - Q1f) - (Q2 - Q2f) \quad \text{Équation 7}$$

$$(Q3 - Q3f) = (Q4 - Q4f) - (Q5 - Q5f) \quad \text{Équation 8}$$

$$(Q5 - Q5f) = (Q6 - Q6f) - (Q7 - Q7f) \quad \text{Équation 9}$$

Pour le calcul de la consistance [x] de chaque courant (x) :

$$100 * (Qxf / Qx) = [x] \quad \text{Équation 10}$$

Pour le calcul du taux de cendres [y] de chaque courant (x) :

$$100 * ((Qx - Qxf) / Qxf) = [y] \quad \text{Équation 11}$$

La simulation de ce système est la résolution de ces équations de façon simultanée ou par une approche séquentielle. Ces deux approches sont définies plus loin. Les résultats obtenus peuvent être sauvegardés dans un fichier.

2.3 Simulateurs statiques et dynamiques

Les simulateurs statiques utilisent des modèles mathématiques pour représenter les différentes opérations unitaires présentes dans les procédés de fabrication du papier. Les unités sont reliées les unes aux autres par des flux de matière, d'énergie et d'information. Le

procédé est ensuite étudié sur ordinateur sans aucune manipulation physique du procédé. Le degré de sophistication de la modélisation mathématique est variable, des modèles relativement simples pouvant être utilisés dans un premier temps. La simulation dynamique devient nécessaire pour suivre diverses perturbations envisageables dans le temps.

2.4 Outils de simulation

L'industrie papetière utilise la simulation comme outil technique pour la conception de nouvelles usines, pour l'étude de scénarios d'opération, pour l'implantation de boucles de contrôle, etc... Powell [10] décrit assez bien chaque type de logiciel disponible sur le marché pour les spécialistes du domaine des pâtes et papier. Le logiciel de base par excellence pour simuler des procédés chimiques est bien sûr Microsoft Excel. À partir de simple feuilles de calcul (spreadsheet) Cole [11] a réalisé une étude économique importante sur la récupération de chaleur d'un moulin à papier. Une autre méthode tout aussi efficace et rapide que les feuilles de calcul pour l'optimisation des coûts de production, est la technologie de pincement. Développée pour l'optimisation des circuits thermiques, la technologie de pincement a inspirée Jacob [12], qui a écrit un programme pour optimiser les réseaux d'eau. Son programme a été appliqué à des problèmes concrets (désencrage, machine à papier) afin d'illustrer le potentiel de la technologie de pincement pour l'établissement de stratégies de fermeture d'eau dans les procédés papetiers. Enfin, pour des analyses multivariées d'entrées et de sorties, les spécialistes peuvent avoir recours à des modèles de réseaux de neurones [13].

2.5 Simulation dans le domaine des pâtes et papier

L'utilisation des logiciels de simulation comme outil de design et d'optimisation des procédés papetiers est chose courante. Durant les années 70, on ne parlait que de simulation en régime permanent. Quant aux simulateurs dynamiques, ils ont fait leur apparition au début des années 80. Aujourd'hui, la plupart des logiciels de simulation dynamique sont

basés sur les grands logiciels en régime permanent. Ce type de logiciel est très convoité et les applications sont très nombreuses [14,15,16] :

- le design d'un nouveau procédé [17]
- le système de la préparation de la pâte [18]
- le blanchiment [19, 20]
- la cuisson de la pâte Kraft [21]
- le contrôle de procédé [22,23]
- l'optimisation des changements de grade [24,25]
- la prédiction des propriétés (force, brillance) [26,27]
- l'étude du procédé face à des perturbations [28]
- la gestion du cassé et de l'eau blanche [29]

Deux types d'approches sont utilisées pour résoudre de tels systèmes : la simulation avec résolution simultanée et la simulation modulaire.

2.5.1 Approche modulaire

Les principaux logiciels de simulation font appel à la notion de module unitaire. Chaque module (épurateurs...) est calculé séparément puis on itère pour équilibrer les bilans de masse sur l'ensemble d'où le nom d'approche modulaire séquentielle. Cette approche considère le procédé comme un assemblage de modules liés par des courants qui transportent de l'information (débits massiques...) d'un module à l'autre. Chaque module possède un modèle mathématique formé d'équations différentielles et algébriques. Les courants de sortie des modules sont calculés à partir des courants d'entrée et des caractéristiques des modules (taux de rejet...). Les modèles mathématiques sont résolus de ma-

nière séquentielle module par module suivant un ordre de calcul prédéfini au début de la simulation. La simulation se poursuit ainsi jusqu'à convergence des courants. Cette méthode demande peu de mémoire vive (RAM [30]) et offre une interface conviviale pour l'utilisateur. Comparativement à l'approche simultanée, les erreurs de simulation sont facilement repérables dans le(s) fichier(s) de données. En plus des nombreuses itérations qui demandent un temps considérable d'exécution, il peut arriver que la solution converge difficilement. Il faut s'attendre à des résultats moins précis avec la simulation modulaire. La précision diminue avec le nombre de boucles de recirculation dans le procédé. Une étude approfondie de l'approche modulaire séquentielle a été réalisée par Hillestad et Hertzberg [31]. Cette approche trouve son application dans la simulation des problèmes de procédés dynamiques.

2.5.2 Équations simultanées

Une autre façon de procéder est l'approche globale dans laquelle toutes les informations concernant le procédé (modèles mathématiques des équipements, bilans de masse et d'énergie reliant les équipements) sont transformées par l'utilisateur en équations pour former une matrice. Les équations du modèle sont résolues simultanément par des calculs matriciels. La résolution est très complexe et les algorithmes peu stables. L'approche simultanée se résout avec peu d'itérations. Ces itérations sont cependant complexes (équations non linéaires, discontinuités...) et le temps requis pour établir la solution matricielle du procédé est généralement long. Ceci exige l'utilisation d'une mémoire RAM plus importante que la simulation modulaire séquentielle [30]. Il est aussi très difficile de localiser les erreurs possibles dans une matrice. Cette approche donne toutefois des résultats très précis et ce même pour des procédés avec plusieurs boucles de recirculation.

2.6 Application de la simulation dans le domaine des pâtes et papier

2.6.1 Machines à papier

2.6.1.1 Machine à papier double-toile

La simulation, en régime permanent, d'une machine à papier double toile a été réalisée par Donat [32] sur le logiciel CADSIM PLUS. Les objectifs étaient de développer les concepts requis pour simuler une machine à papier en portant une attention particulière à la zone de formation. La zone de formation est représentée à la figure 2.2 et les courants respectifs se retrouvent au tableau 2.1. La machine à papier journal a une capacité de production 650 – 700 t/j avec un mélange de pâtes de haut rendement au sulfite, mécanique, de désencrée et de kraft. Le modèle, figure 2.3 comprend les zones de formation et des presses, la sècherie, ainsi que la boucle courte de recirculation et le contrôleur de grammage. Les éléments suivis dans la simulation sont les fibres longues et courtes et de l'eau. La calibration de la simulation repose sur la comparaison avec les données mesurées et de l'information pertinente du procédé. La zone de formation est divisée en quatre modules de drainage : le sabot de formation, la boîte à succion, et les deux rouleaux de succion. Le sabot de formation a été modélisé en utilisant les équations suivantes respectivement pour les taux de rétention des fines et de drainage :

$$R_{shoe}^f = 27.685 + 0.312B + 0.03I + 1.129Q_{peo} \quad \text{Équation 12}$$

$$Dr_{shoe} = -1.416 R_{shoe}^t + 159.8 \quad \text{Équation 13}$$

R_{shoe}^t : rétention totale du matelas fibreux au sabot de formation

B: dosage de la bentonite (kg/t de pâte désencrée)

I: dosage du cofacteur (cm³)

Q_{peo} : dosage du PEO, agent de rétention, (L/min)

Pour obtenir des résultats valables, le degré de sophistication des modèles proposés a été augmenté en 5 étapes.

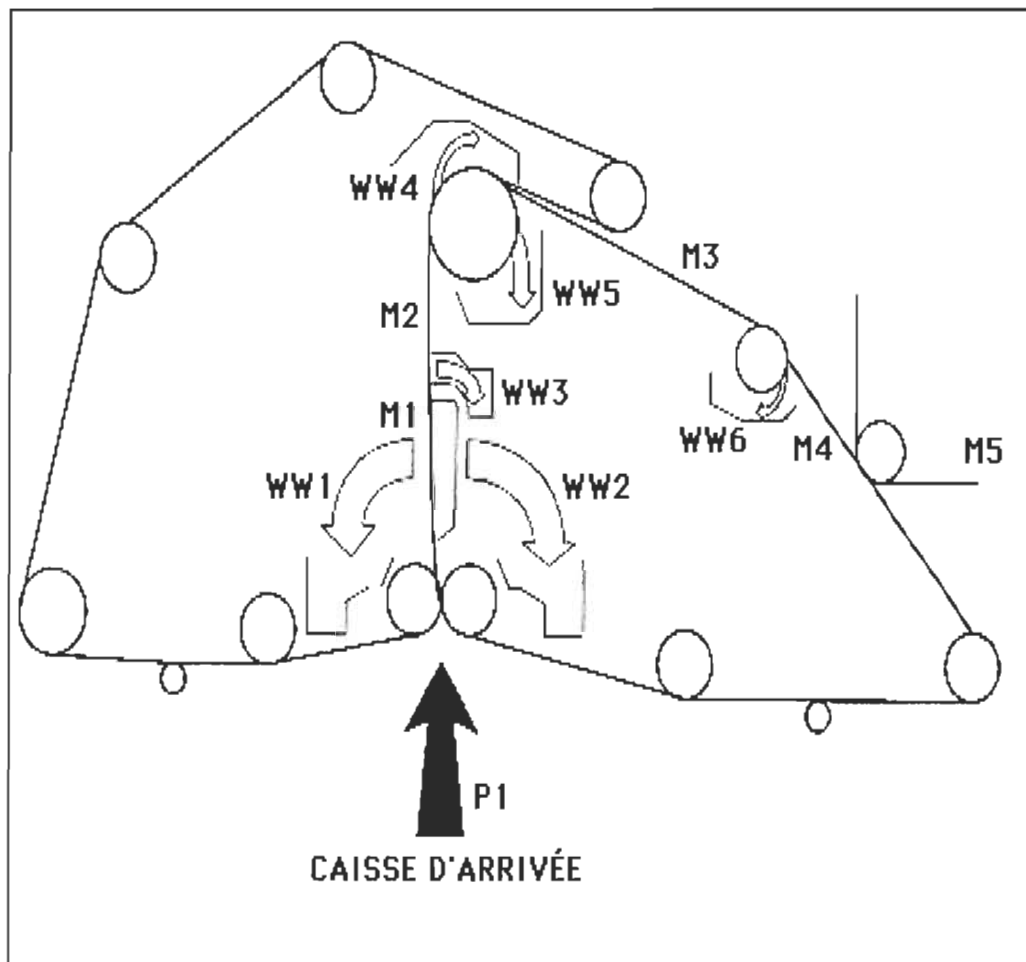


Figure 2.2 Zone de formation d'une machine à papier double-toile

Tableau 2.1 Courants de la zone de formation

Courant	Élément correspondant
M1-M5	Matelas fibreux
P1	Caisse d'arrivée
WW1, WW2	Sabot de formation
WW3	Boîte à succion
WW4, WW5	1 ^{er} rouleau de succion
WW6	2 ^e rouleau de succion

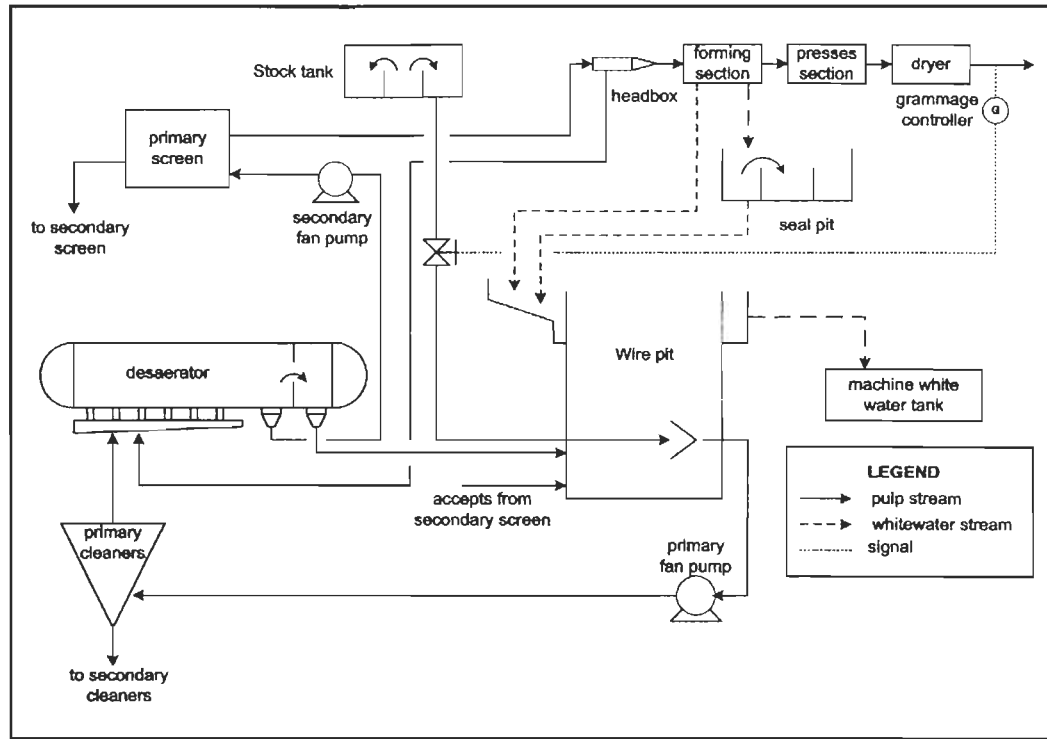


Figure 2.3 Diagramme d'écoulement de la machine double-toile

Première étape

Le drainage de chaque élément est défini par la quantité d'eau enlevée du matelas fibreux de ce module en fonction de la quantité d'eau contenue dans la pâte de la caisse d'arrivée. Les relations de drainage pour la boîte à succion, pour le 1^{er} rouleau de succion courant du haut, pour le 1^{er} rouleau de succion courant du bas et le 2^e rouleau de succion sont :

$$Dr_{sb} = 100(W_{ww3}/W_{p1}) \quad \text{Équation 14}$$

$$Dr_{srlt} = 100(W_{ww4}/W_{p1}) \quad \text{Équation 15}$$

$$Dr_{srlb} = 100(W_{ww5}/W_{p1}) \quad \text{Équation 16}$$

$$Dr_{sr2} = 100 (W_{ww6}/W_{p1}) \quad \text{Équation 17}$$

Des valeurs typiques de drainage pour ces éléments sont données à la figure 2.4. Les simulations sont comparées aux résultats expérimentaux recueillis lors de deux conditions d'opérations différentes de la machine à papier journal.

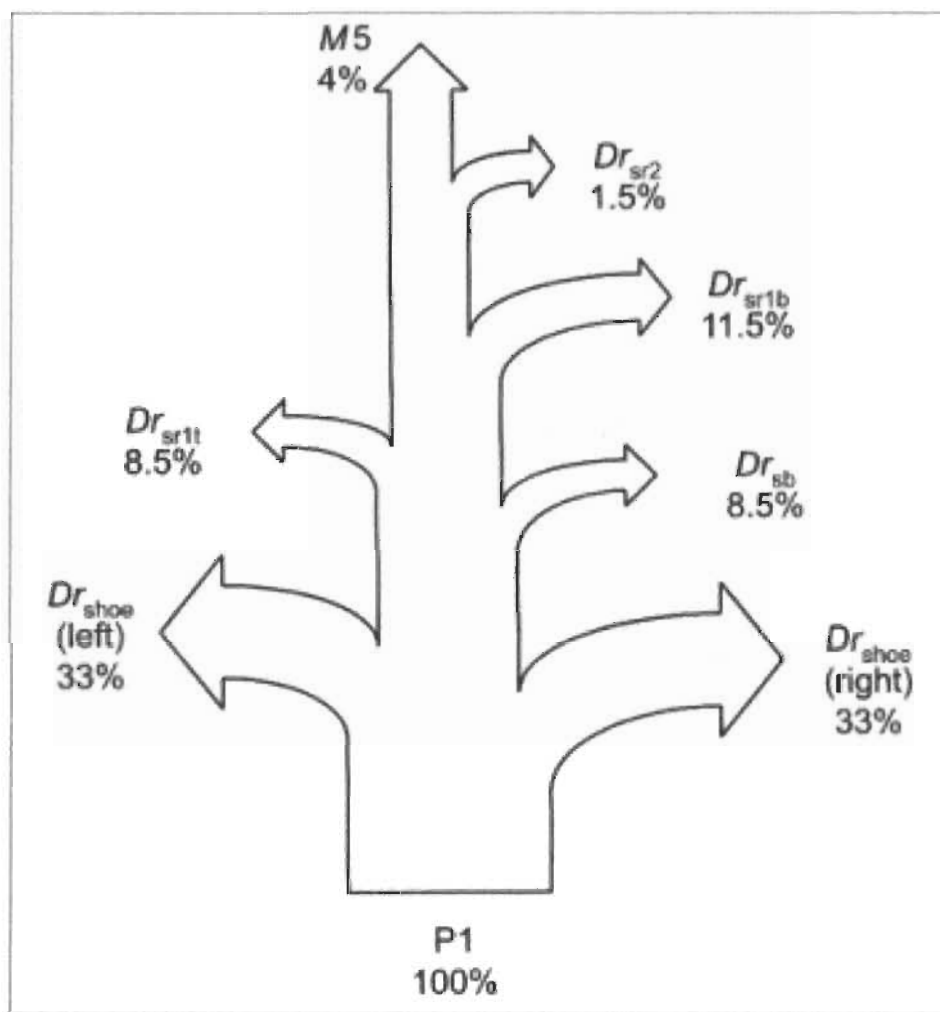


Figure 2.4 Données de drainage de BELOIT

Le paramètre important à vérifier est la consistance du matelas fibreux avant les presses. Les simulations sont exécutées en régime permanent. Si l'on compare la premier stage, les valeurs simulées ne correspondent pas vraiment aux conditions d'opération. La différence ne se trouve pas au niveau du débit volumique du matelas fibreux (lequel est constant pour les deux conditions d'opération), mais à la différence importante dans le débit volumique de l'eau. Quand Dr_{shoe} est bas, la quantité d'eau restante dans le matelas fi-

breux du sabot de formation est grande, mais le débit volumique de l'eau de chaque module demeure le même puisque cela dépend de la quantité d'eau de la caisse d'arrivée. La conséquence est que le débit prédit de l'eau du matelas est trop grand.

Deuxième étape

La consistance du matelas fibreux serait plus stable si le drainage est fonction de la quantité d'eau entrant dans chaque module respectif et non de la quantité d'eau de la caisse d'arrivée. Les relations pour la boîte à succion, pour le 1^{er} rouleau de succion courant du haut, pour le 1^{er} rouleau de succion courant du bas et le 2^e rouleau de succion sont :

$$Dr_{sb} = 100(W_{ww3}/WM1) \quad \text{Équation 18}$$

$$Dr_{srlt} = 100(W_{ww4}/WM2) \quad \text{Équation 19}$$

$$Dr_{srlb} = 100(W_{ww5}/WM2) \quad \text{Équation 20}$$

$$Dr_{sr2} = 100 (W_{ww6}/WM3) \quad \text{Équation 21}$$

L'approche 2 donne de meilleurs résultats.

Troisième étape

Puisque la consistance des courants d'eau blanche dépend à la fois de la rétention et du drainage, il devient important de calculer la rétention des fines pour chaque élément de drainage. La rétention des fines (%) s'écrit selon les relations suivantes pour la boîte à succion, pour le 1^{er} rouleau de succion courant du haut, pour le 1^{er} rouleau de succion courant du bas et le 2^e rouleau de succion :

$$R_{sb}^f = 100(f_{M2}/f_{M1}) \quad \text{Équation 22}$$

$$100-R_{srlt}^f = 100(f_{ww4}/f_{M2}) \quad \text{Équation 23}$$

$$100-R_{srlb}^f = (f_{ww5}/f_{M2}) \quad \text{Équation 24}$$

$$R_{sr2}^f = 100(f_{M4}/f_{M5}) \quad \text{Équation 25}$$

Quatrième étape

L'idée est de calibrer la simulation avec un critère de plus, soit la consistance de la caisse d'arrivée (C_{P1}). Les valeurs simulées de la consistance de la caisse d'arrivée ($C_{P1,simu}$) pour les deux conditions d'opération sont comparées aux données expérimentales au tableau 2.2. Comme l'indiquent les données expérimentales, une augmentation du dosage des agents de rétention améliore R_{shoe}^f , ce qui explique le résultat de $C_{P1,simu}$ à la hausse pour la série 2. De plus, si R_{shoe}^f augmente, logiquement la rétention de chaque module de drainage augmente aussi. La solution est d'écrire un modèle linéaire de la rétention des fines en fonction de R_{shoe}^f . La rétention de chaque module devient donc :

$$R_{element}^f = a R_{shoe}^f + b \quad \text{Équation 26}$$

Les coefficients « a » et « b » ont été estimés par essais et erreurs jusqu'à ce que les consistances du matelas fibreux et des courants d'eau blanche reflètent la réalité et que les valeurs de $C_{P1,simu}$ se rapprochent des valeurs de $C_{P1,exp}$. L'auteur assume que plus le module de drainage est près la section des presses, plus $R_{element}^f$ est grande. Selon les résultats de la 4^e approche la simulation a été bien calibrée avec C_{P1} .

Tableau 2.2 Expérience et simulation d'une machine à papier double-toile

Paramètres	Unité	Condition 1	Condition 2
B	Kg/t désencré	3	7
I	cm ³ /min	130	250
Q	L/min	13	24
R_{shoe}^f (Équ.12)	%	47	65
R_{shoe}^t (bilan)	%	67	78
Dr_{shoe} (Équ.13)	%	65	49
$C_{M5,exp}$	%	15	13
$C_{M5,simu}$ (étape 1)	%	23	3
$C_{M5,simu}$ (étape 2)	%	14	10
$C_{M5,simu}$ (étape 4)	%	15	11
$C_{M5,simu}$ (étape 5)	%	15	13
$C_{P1,exp}$	%	0.95	0.78
$C_{P1,simu}$ (étape4)	%	0.95	0.88
$C_{P1,simu}$ (étape5)	%	0.95	0.78

Cinquième étape

En comparant les valeurs de $C_{M5,simu}$ et $C_{M5,exp}$ le drainage doit être redéfini après une calibration de la rétention. La consistance du matelas fibreux est affectée à la fois par le drainage et la rétention tandis que la consistance de la caisse d'arrivée varie seulement en fonction de la rétention. Il est donc important de modifier le drainage après un changement de $R_{element}^f$. Selon des travaux réalisés antérieurement, la machine à papier journal se comporterait comme si aucun agent de rétention n'était utilisé. Dans la zone de formation de la machine, une bonne rétention des fines bouche les pores du matelas fibreux et prévient le drainage de l'eau. Dans la deuxième zone, zone de vide de la machine à papier, un bon drainage est le résultat d'une bonne rétention. En effet, tous les pores du matelas fibreux sont fermés favorisant ainsi le drainage de l'eau par les modules de vide.

Selon le comportement de la machine, les modèles simples de drainage de chaque module prennent la forme suivante :

$$Dr_{\text{element}} = c R_{\text{shoe}}^t + d \quad \text{Équation 27}$$

Les coefficients « c » et « d » ont été estimés par essais et erreurs jusqu'à ce les résultats des simulations donnent des valeurs C_{M5} se rapprochant de la réalité. Ce modèle ne s'applique pas à Dr_{sr1b} , l'eau étant enlevée par la force centripète et non par le vide.

Deux paramètres visés sont la consistance de la caisse d'arrivée et la consistance avant les presses. Le premier est mesuré en usine et se compare facilement avec la simulation.

En résumé, la consistance du matelas ne doit pas être fixée. La rétention des fines et le drainage doivent être estimés pour chaque élément de drainage. Bien sûr un modèle de R_{fshoe} doit être développé pour chaque modèle.

2.6.1.2 Bout humide

Une machine à papier basée sur un procédé réel a été simulée par Yap [33]. La production quotidienne d'un papier de spécialité dépasse les 550 tonnes. La figure 2.5 représente un schéma simplifié du procédé. Le logiciel de simulation dynamique IDEAS, de Simons Technologies, a servi à la modélisation et à la simulation. Comme CADSIM PLUS, ce logiciel comprend une gamme complète de modules représentant des équipements (mélangeurs, séparateurs, réservoirs...).

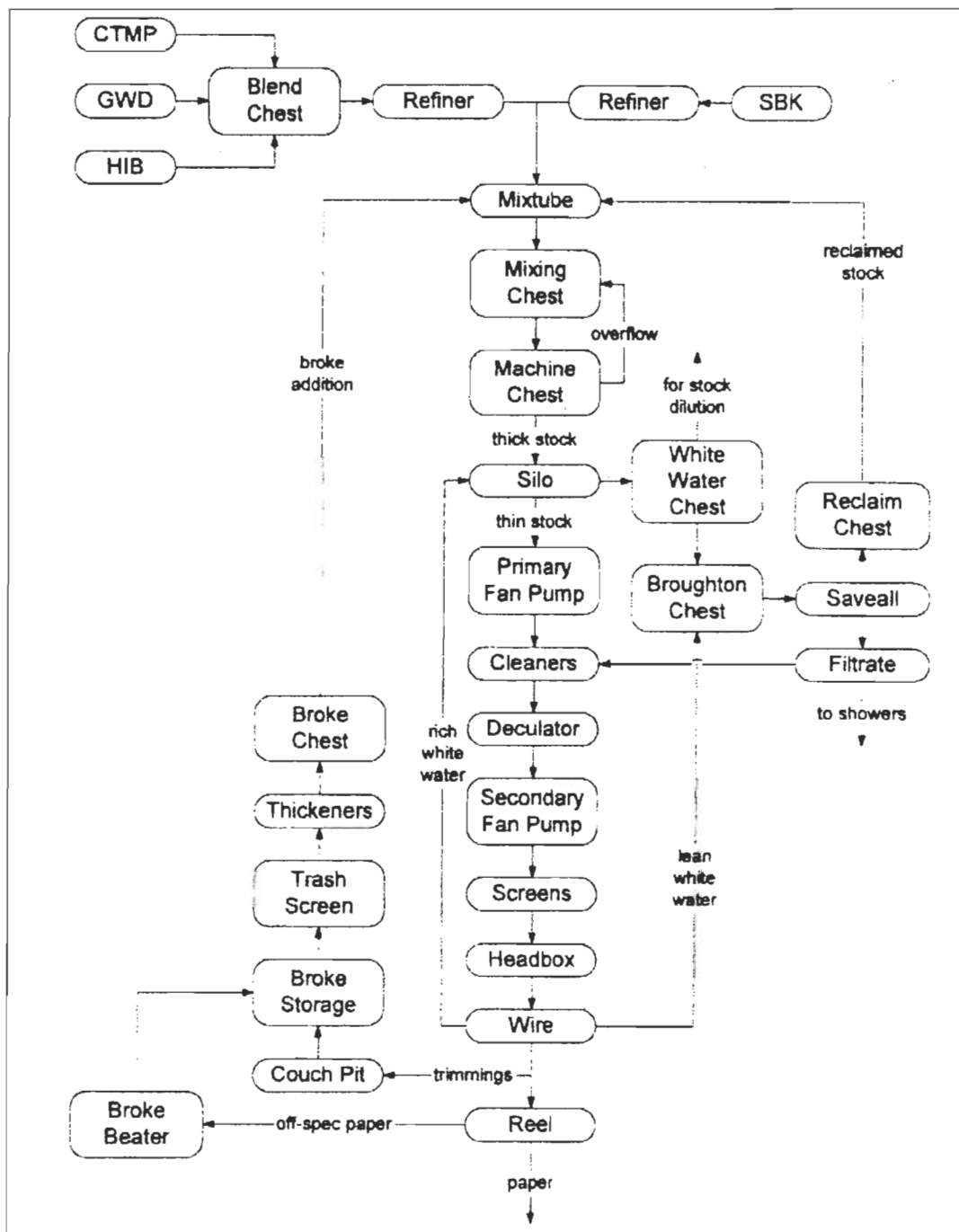


Figure 2.5 Schéma simplifié d'un procédé papetier

Des équations pour la rétention des fibres, des fines, et des cendres ont été obtenues à partir d'analyses empiriques. Le débit de flocculant (QF) joue un rôle sur la rétention

des fines et des cendres mais n'a cependant aucun effet sur la rétention des fibres, comme dans l'exemple précédent. Les rétentions de fibres, de fines et de cendres dans la zone formation sont calculées selon les relations suivantes :

$$K_{\text{Fibre}} = 80 \quad \text{Équation 28}$$

$$K_{\text{Fines}} = 59 (Q_F)^{0.001} \quad \text{Équation 29}$$

$$K_{\text{Cendres}} = 15 (Q_F)^{0.2} \quad \text{Équation 30}$$

La zone de formation de la machine à papier est représentée par 5 séparateurs, figure 2.6. Dans un premier temps, la simulation a été validée en régime permanent à partir de données recueillies sur la machine à papier. Ensuite, plusieurs estimations et hypothèses ont été nécessaires pour obtenir en mode dynamique 70% des résultats avec moins de 5% d'erreur. Les simulations dynamiques étudiées ont porté sur le changement de vitesse de la machine à papier et les changements de grade.

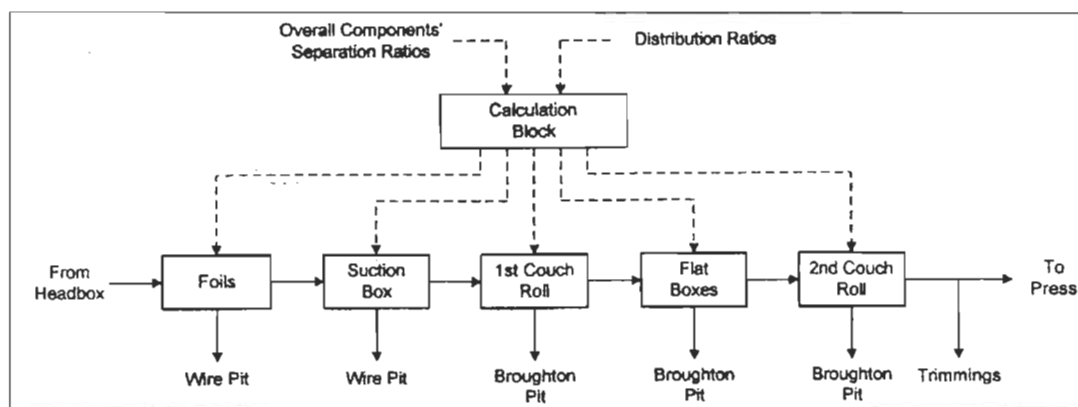


Figure 2.6 Configuration de la modélisation des séparateurs

Pour calibrer le modèle à partir de données réelles des hypothèses sont énoncées :

- composition de la pâte: eau, fines, fibres et solides dissous.
- Les solides dissous suivent la phase aqueuse et ne sont pas absorbés par le matériel fibreux.
- La dynamique du procédé n'est régit que par le temps de résidence des cuiviers. Les cuiviers sont considérés comme des réservoirs parfaitement mélangés.
- La dynamique des tamis, des épurateurs et de la zone de formation de la machine à papier est négligeable

Des études antérieures ont démontrées que la rétention de la première passe était fortement liée à la quantité de fines dans la caisse d'arrivée. En effet, une forte corrélation négative a été observée. À partir de ces informations le modèle de la rétention première passe de rétention est :

$$R = (R_f - R_F) Y_f + R_F \quad \text{Équation 31}$$

R = rétention première passe du matériel fibreux total (%)

R_f = rétention première passe des fines (%)

R_F = rétention première passe des fibres (%)

Y_f = fraction des fines dans la caisse d'arrivée

Si R_f et R_F sont des constantes pour une condition donnée, l'équation est une simple relation linéaire de la rétention première passe du matériel fibreux total et de la quantité de fines dans la caisse d'arrivée. Et puisqu'il y a moins de fibres que de fines qui recirculent, $R_F > R_f$, la pente Y_f est négative. D'après la littérature les auteurs sont d'accord pour dire que R_F n'est pas affecté par Y_f , ce qui n'est pas toujours le cas pour R_f . Avec peu de données expérimentales dans différentes conditions machine, il est difficile de tirer une conclusion. Pour cette raison, l'auteur a considéré la rétention première passe des

fines constante. L'équation a été appliquée dans les 2 zones de formation de la machine à papier

Le modèle mathématique, défini par un ensemble d'équations différentielles algébriques, a été calculé à l'aide du logiciel SPEEDUP. La simulation du procédé consiste à résoudre un système d'équations de façon simultanée. Chaque équation représente une ou des pièces d'équipement. Le réservoir d'entreposage de la pâte, le cuvier machine, la caisse d'arrivée et le matelas fibreux sont les endroits stratégiques choisis pour étudier la distribution du matériel fibreux et des solides dissous en régime permanent. Les simulations en mode transitoire, ont portées sur les dynamiques d'une augmentation de fines dans l'alimentation et de la quantité de cassé recirculé.

2.6.2 Fermeture des circuits

Les normes environnementales obligent les industries des pâtes et papiers à limiter le débit d'effluent rejeté, donc à augmenter leur degré de fermeture des circuits d'eau de procédé. Cette réduction entraîne une augmentation de la concentration des contaminants dans le système d'eaux blanches, qui peuvent influencer la qualité du produit de même que le bon fonctionnement du procédé. Plusieurs études ont déjà été effectuées à ce sujet, et quelques usines dans le monde opèrent sans effluent liquide. Il est à noter que la fermeture des circuits d'eau de procédé est plus facilement réalisable pour les usines de carton. D'ailleurs, Cartons St-Laurent [36] opère avec zéro effluent. Pour analyser les impacts de la fermeture des circuits d'eau des machines à papier journal, il est conseillé d'utiliser la simulation comme outil de travail [37,38,39]. Des exemples de simulations pour la fermeture des circuits d'eau de procédé sont présentés dans les sections suivantes.

2.6.2.1 Recyclage des effluents et du biotraitement

L'objectif de l'étude [40] était de développer et évaluer une gamme de stratégies de fermeture de circuits d'eau, sans que le coût opératoire augmente et en gardant une même qualité de produit final. L'usine étudiée produit 500 t/j de papier journal à partir d'une pâte thermo-mécanique et selon la demande, une pâte recyclée. La demande en eau fraîche du procédé actuel est de 6000 t/j. La température de l'eau provenant d'un cours d'eau voisin est estimée à 0°C en hiver et à 20°C en été. Cette eau, chauffée jusqu'à 60°C, consomme en vapeur 557 t/j en hiver et 387 t/j en été. Les sources d'eau de substitution de l'eau fraîche sont l'eau des presses, le surplus d'eau blanche et l'effluent traité. Les trois courants considérés pour le recyclage ont des températures différentes et contiennent tous des solides dissous. La concentration des solides dissous ainsi que la réduction du besoin en vapeur de chauffe au cuvier d'eau tiède ont été déterminées par simulation sur ASPEN PLUS pour cinq configurations de fermeture. Les simulations ont été effectuées selon deux régimes (hiver et été). L'analyse technique des stratégies, figure 2.8, avait pour objet d'évaluer leur impact respectif sur la concentration des solides dissous dans la caisse d'arrivée de la machine et dans l'alimentation du système de traitement, sur la consommation de vapeur pour les douches, sur la consommation d'eau fraîche et sur le débit d'effluent rejeté par le procédé. Enfin, l'analyse économique avait pour objet de déterminer un temps de recouvrement simple calculé sur la base des investissements nécessaires et de l'impact des changements envisagés sur le coût opératoire de l'usine.

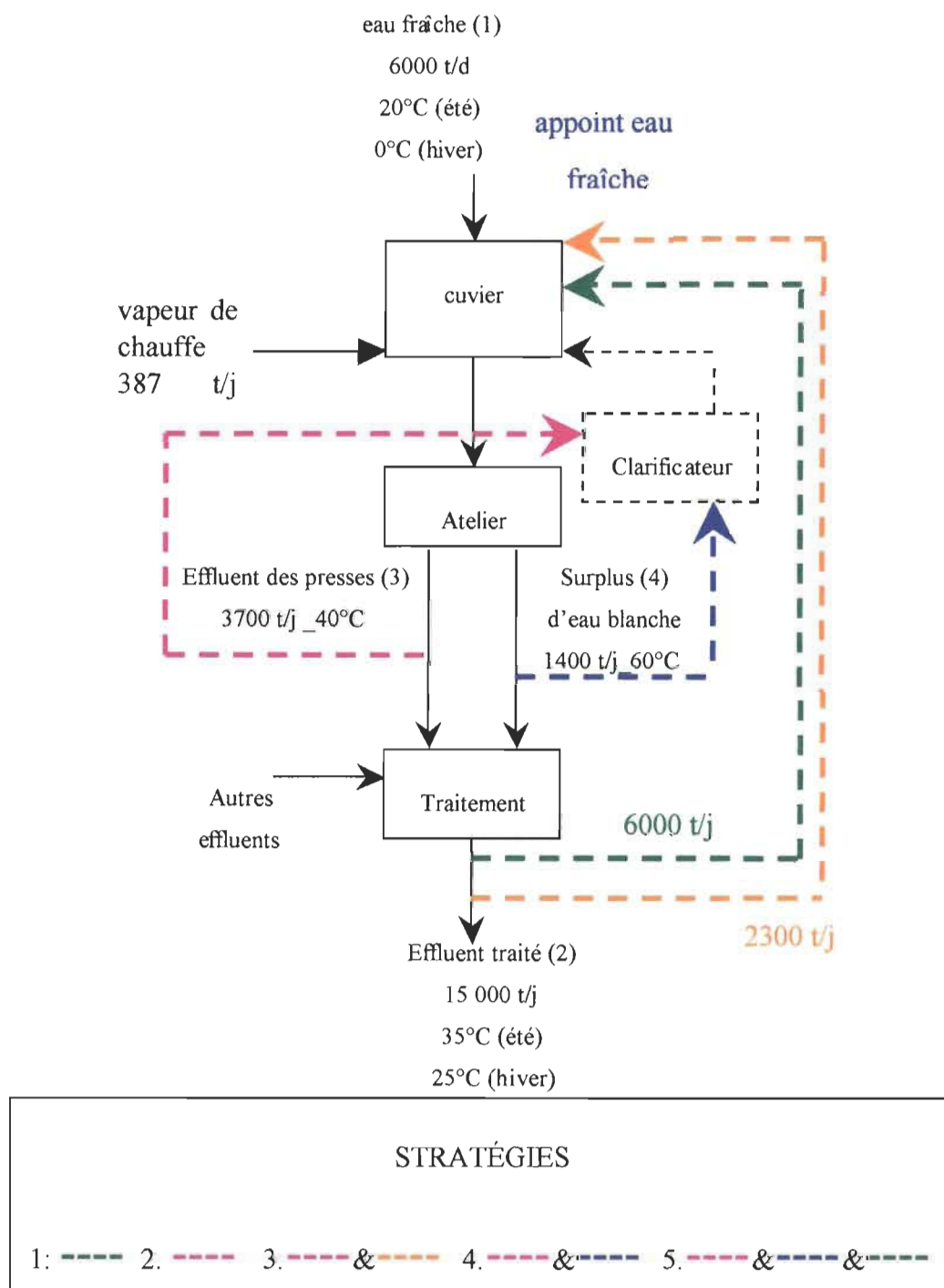


Figure 2.8 Implantation des stratégies de fermeture

Stratégie 1 : Consiste à remplacer complètement l'eau fraîche (1) par l'effluent traité (2).

Stratégie 2 : L'effluent des presses (3) est entièrement recyclé après avoir été clarifié.

Stratégie 3: Recyclage de l'effluent des presses (3) et de l'effluent traité (2).

Stratégie 4: Recyclage de l'effluent des presses (3) et du surplus d'eau blanche (4) après clarification.

Stratégie 5 : Recyclage combiné des trois courants disponibles (2), (3) et (4).

La réutilisation de ces sources d'eau permet de réduire la consommation de vapeur de chauffe mais entraîne une augmentation de la concentration en solides dissous dans les circuits d'eau et de pâte, sans toutefois dépassé des seuils critiques (procédé et qualité du produit fini). La stratégie 1 entraîne l'investissement minimal (150 000 \$Can) pour le temps de retour le plus court (1.4a). C'est la stratégie la plus sécuritaire puisque l'augmentation de la quantité de solides dissous dans l'alimentation à la machine à papier est seulement de 10%. Pour ces raisons, la direction de l'usine a décidée d'implanter la stratégie 1 en procédant par étapes successives faisant l'objet d'un suivi soigné pour déterminer l'évolution réelle du procédé et l'impact éventuel sur la qualité du papier produit. Par contre, la concentration des solides dissous dans l'alimentation à la machine est considérablement augmentée (de 150%) pour les stratégies 4 et 5. Ces stratégies permettent de réaliser des économies de vapeur importantes (202 000 \$Can/a) et de réduire le débit d'effluent de procédé, ce qui approche la fermeture totale. Cependant, des données vérifiées manquantes sur le comportement du procédé en situation de fermeture poussée comporterait des risques techniques difficiles à évaluer suite à leur implantation. Pour élaborer des scénarios de fermeture plus complexes et intégrés, l'usine de Danohue d'Amos a développé une simulation complète de son procédé [41].

2.6.2.2 Impact thermique

L'étude [42] présentée ici porte sur l'usine Donohue d'Amos. Des essais préliminaires de simulation ont montré que le premier facteur limitant les recirculations prévues est la température. Les scénarios de fermeture étudiés pour trois saisons différentes (hiver, été, saison intermédiaire) ont pour objectifs d'évaluer plus précisément les limites thermiques et les besoins de refroidissement. L'usine produit 500 t/j de papier journal et consomme, selon les saisons, de 30 à 44 m³/t d'eau fraîche. Les recirculations de l'eau des pompes à vide et de l'eau traitée sont les deux scénarios envisagés. Aux scénarios, deux modèles ont été utilisés; le premier ne comporte pas de refroidisseur et une partie de l'eau doit être rejetée à la rivière si la température du réservoir d'eau fraîche dépasse 20°C. Le second modèle comporte un refroidisseur (une tour à eau) traitant l'eau envoyée à la rivière. Le cas de base et une combinaison des 2 scénarios ont également été analysés. À l'aide du logiciel CADSIM PLUS, 24 simulations ont été faites; les quatre cas ont été étudiés pour chacune des trois saisons et toutes les simulations ont été faites avec et sans refroidisseur. La simulation des cas avec le refroidisseur n'avait que pour but d'évaluer la puissance du refroidissement nécessaire pour maintenir un niveau de fermeture maximum même en saison chaude. La recirculation de l'eau de scellement des pompes à vide utilisée seule n'est intéressante que pour l'hiver. La combinaison des deux projets de recirculation procure de 22 à 43% de réduction de consommation d'eau fraîche sans utiliser d'unité de refroidissement. Avec une unité de refroidissement d'une capacité de 455 GJ/j, le niveau de réduction, en hiver, pourrait atteindre 65%. Les économies réalisables pour le cas 4 seraient d'environ 400 000 \$/an.

2.6.2.3 Stratégies de gestion de l'eau blanche

L'usine qui a fait mention de l'étude [43] utilise 100% de pâte thermo-mécanique pour produire 500 t/j de papier journal. La consommation d'eau de procédé varie de 10 à 15 m³/t et la concentration des solides dissous à la caisse d'arrivée est de 8000 mg/L. À 800

mg/L, les effets négatifs des solides dissous se font déjà sentir et une augmentation devrait avoir qu'un effet négligeable. Le logiciel de simulation en régime permanent, PAPMOD, a été sélectionné pour le projet. Les résultats de la simulation se rapprochaient de $\pm 15\%$ des données expérimentales. Cinq scénarios de la gestion du circuit d'eau blanche ont été simulés : la recirculation de l'eau de la section de la machine à papier, l'ajout d'une section aux épurateurs, la réutilisation appropriée de l'eau blanche de la presse vis, l'augmentation de l'utilisation de l'eau blanche pour les douches de la machine à papier, et enfin une combinaison des quatre stratégies de gestion. La mise en oeuvre de ces stratégies de gestion de l'eau blanche pourrait réduire les pertes en fibres de 7.5 t/j et la consommation d'eau fraîche de 1700 m³/j. Une simulation dynamique s'avère nécessaire pour quantifier les effets de telles modifications.

2.6.3 Autres exemples

2.6.3.1 Unité de désencrage

Pour les papeteries, la pâte recyclée constitue une source de matière à moindre coût. L'objectif du désencrage est séparer les particules d'encre des fibres cellulosiques. Cette opération nécessite d'importantes quantités d'eau. Le but de l'étude [44] était de montrer par simulation numérique comment les circuits des unités de désencrage peuvent être déconcentrés par l'introduction d'un traitement complémentaire dans la boucle de recyclage des eaux. Les auteurs ont modélisé une unité simplifiée représentative de la réalité industrielle ne comportant qu'une série de cellules de flottation sans dispersion à chaud ni blanchiment, figure 2.9. Les différentes simulations ont été réalisées avec un apport au tritrateur de 300 t/j en vieux papiers secs contenant 8% d'impuretés. La valeur du débit d'eau traité (Q₁₀) est importante car elle conditionne le dimensionnement du système de traitement. Il a été démontré que l'efficacité de l'unité de désencrage dépend fortement de paramètres tels que l'efficacité d'élimination des impuretés du traitement, le taux de traitement et le type d'épaississement utilisé. Pour un traitement efficace dans la boucle, il suffit de recycler une fraction d'environ 30% du débit recyclé pour

maintenir une efficacité correcte de l'unité de désencrage. De tels résultats ont d'ailleurs été corroborés par la pratique industrielle dans le cas d'une usine de papier ondulé.

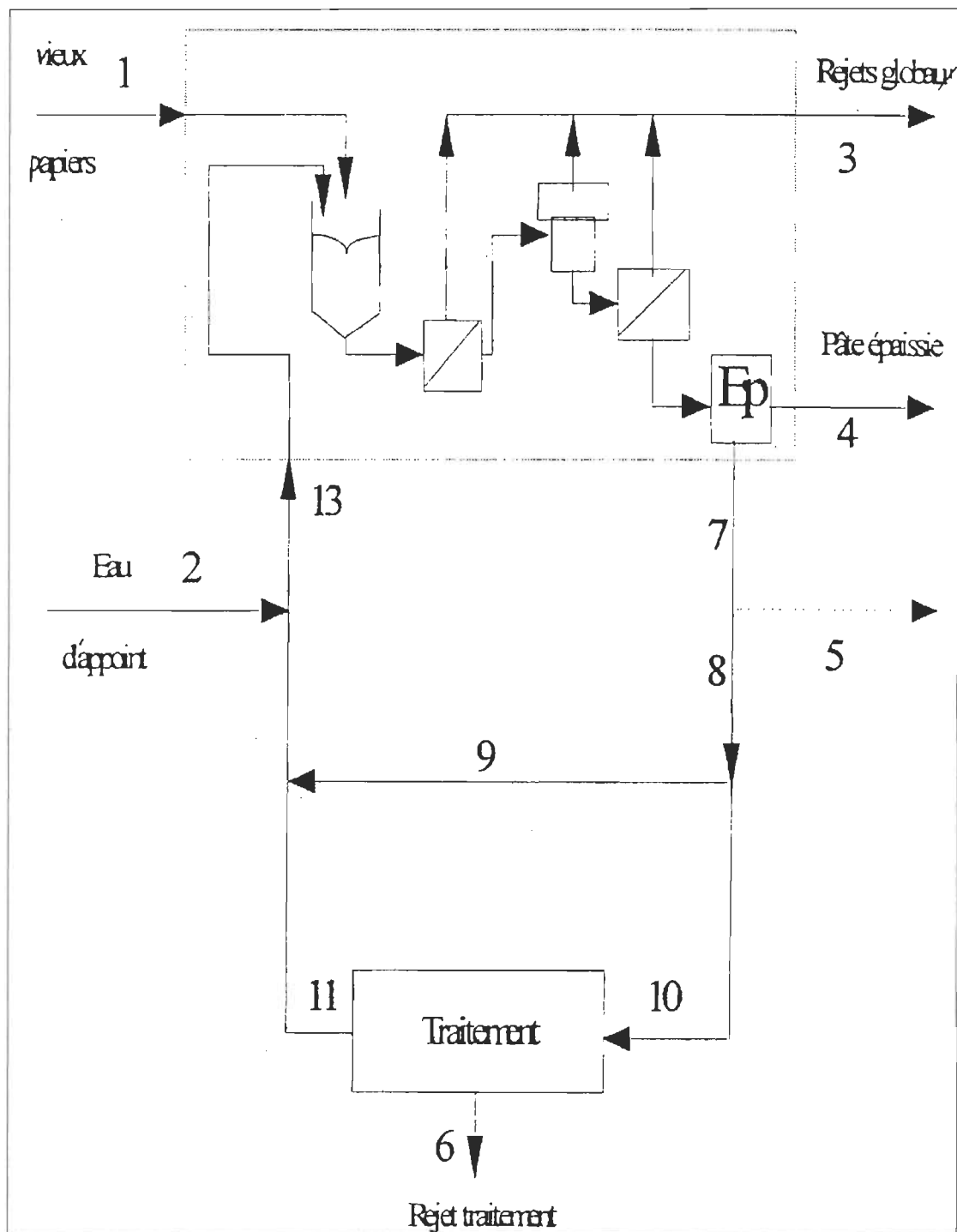


Figure 2.9 Schéma simplifié d'une unité de désencrage

2.6.3.2 Prédiction de composés organiques volatiles

Il y a toujours un risque de formation de plusieurs composés organiques volatiles comme le méthanol et le chloroforme dans les condensats des laveurs de pâte des usines de pâte kraft. Des recherches antérieures ont démontrées les bien faits de la simulation pour suivre les concentrations de méthanol et modifier le procédé des papetières. L'étude présentée [45] pousse les concepts plus loin en utilisant :

- la température de la liqueur et la concentration du méthanol pour prédire, à l'équilibre, la concentration du méthanol dans l'air
- les taux de transfert de matière pour prédire le degré de rapprochement des concentrations actuelles du méthanol dans l'air et des valeurs à l'équilibre
- les mesures actuelles du méthanol dans l'air plutôt que les différences des débits de liqueurs pour la validation du modèle

L'usine simulée est une usine Nord Américaine d'une capacité de production de 600 t/j. Elle fabrique de la pâte de bois mou blanchie sans chlore. Les simulations ont servies à valider le modèle. Ce modèle servira d'outil pour évaluer des options de fermeture de l'usine.

2.6.3.3 Écosystèmes industriels

Les écologistes industriels ont développé le nouveau concept d'écosystème industriel par analogie à l'écosystème naturel. La ville de Kalunborg au Danemark est l'exemple le plus cité des relations symbiotiques. Un système complexe d'échange d'effluents (solide et liquide) et d'énergie existe entre 10 compagnies, la communauté résidentielle et les fermes locales. Par exemple, le soufre résiduel de la raffinerie Statoil est recyclé dans une manufacture d'acide sulfurique localisée tout près de la raffinerie. Pour sa part, l'industrie des pâtes et papier possède un certain potentiel pour l'établissement de plu-

sieurs relations symbiotiques. Pour établir de tels écosystèmes industriels, la simulation semble être un outil efficace. Le but de l'étude [46] était donc d'évaluer, par simulation, le potentiel d'une relation symbiotique entre cinq industries. La figure 2.10. Présente un schéma de l'écosystème simulé avec CADSIM PLUS.

Les scénarios envisagés étaient :

- Aucune connexion entre les compagnie
- Le cycle de la fibre existant simulé
- Cas 2 + une partie de l'eau usée de Minas Basin est recyclé à D
- Cas 2 + une partie de la chaleur usée de Minas Basin est envoyée à D
- Combinaison des cas 2,3 et 4

Les résultats du cas 4 sont économiquement intéressants pour la compagnie D qui était en mesure de diminuer sa consommation d'huile de 25 % en utilisant la chaleur usée de Minas Basin. Enfin, la recherche a démontré le potentiel de la simulation pour la modélisation d'écosystèmes industriels.

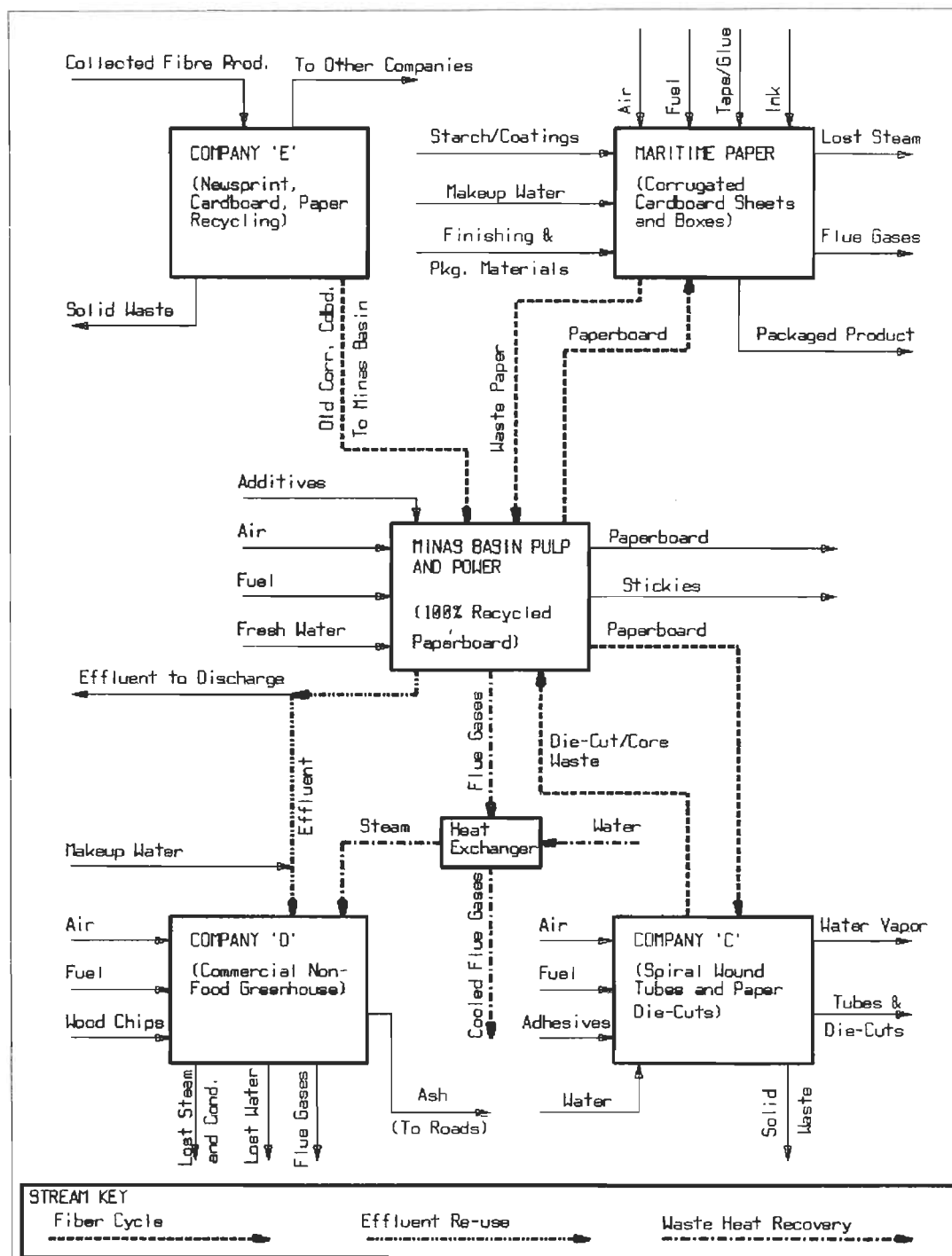


Figure 2.10 Schéma d'un écosystème industriel

Chapitre 3 - Méthodologie

3.1 Implication de CDM

Dès qu'il y a une problématique industrielle il faudrait envisager toute possibilité d'attaquer le problème par une simulation. Non seulement le temps et la disponibilité des ressources humaines et matérielles mais aussi la connaissance des gens sur le procédé et le logiciel deviennent alors des contraintes importantes pour démarrer une étude par simulation. CDM avait de bonnes intentions pour résoudre le plus rapidement la problématique. Pour différentes raisons, il s'est écoulé 6 mois entre l'offre de services et le début du projet. Le projet a même failli demeurer au stade embryonnaire. Soit dit en passant, l'accueil de CDM n'a pas été pour le moins chaleureux.

Au départ CDM semblait être en mesure de fournir les ressources humaines nécessaires pour démarrer le travail mais au fil du projet les occupations de chacun ont changées accordant ainsi moins de temps à la simulation. Finalement deux personnes seulement pouvaient apporter sporadiquement leur aide sur le procédé. Quoique le résultat fut très satisfaisant, une étude par simulation devrait impliquer une équipe dont chacun des membres connaît tant le logiciel que le procédé.

3.2 Hypothèses

Il serait très ardu de tenter d'autres expériences sur l'ajustement de la couleur avec une feuille moins large. L'utilisation de la simulation s'avère donc un outil très efficace pour une première investigation. Il est toutefois nécessaire d'émettre une série d'hypothèses avant d'établir le modèle à simuler. Comme dans le cas présent, il arrive que d'autres hypothèses soient émises au cours du projet.

La première explication que l'on puisse donner à l'impossibilité d'ajuster la couleur avec une bande de papier, est qu'il doit y avoir sûrement un temps maximum pour ajuster la

couleur dans de telles conditions. Cette situation peut s'expliquer par une trop longue période de corrections avec une trop petite largeur de feuille, ou par une variation de la qualité des pâtes qui alimentent le cuvier machine lors d'élargissements de la feuille, ou par la rétention des fibres et des pigments. La qualité d'une pâte dépend de son taux de cendres, de sa couleur et de sa consistance. Les scénarios qui seront étudiés permettront entre autre de voir l'effet d'une alimentation plus homogène sur l'ajustement de la couleur. Les bilans mécaniques et énergétiques ne seront pas simulés. La température est supposée constante et ne devrait pas affecter le procédé en général. Les vannes, les pompes, la tuyauterie ne figurent pas dans les simulations. Un manque d'information sur les paramètres des vannes justifie leur absence. Le module pompe dans CADSIM donnait des résultats (débits) plus élevés pour une pâte de plus haute densité. Dommage car ce module aurait pu être intéressant pour les débits inconnus. Quant à la dynamique de la tuyauterie (délais) elle est négligeable.

Trois raisons expliquent une simulation ne contenant que des bilans massiques. Tout d'abord, la présence de bilans mécaniques dans une simulation oblige à connaître la pression à plusieurs endroits. Il n'était pas question que CDM s'équipe de nouveaux appareils de mesure de pression qui sont assez dispendieux. Deuxièmement, pour obtenir des résultats crédibles, la linéarité des vannes est très importante. La linéarité s'obtient à partir d'expériences sur le champs en variant l'ouverture de la vanne et en mesurant le débit. Cet exercice très rigoureux a quand même été réalisé à l'étape de la validation mais non dans le but de trouver la linéarité mais pour trouver les débits inconnus en fonction de l'ouverture des vannes. Enfin, le module pompe est l'élément le plus important d'un bilan mécanique. Il permet d'établir une simulation avec plusieurs débits inconnus. Chaque pompe a été modélisée individuellement avec son cuvier respectif. Les résultats obtenus étaient tous trop élevés. La façon dont le module pompe est programmé dans CADSIM résulte en une augmentation du débit avec une augmentation de la consistance. Cela a pris un temps considérable pour conclure que la partie mécanique dans CADSIM est très difficile à simuler.

Dans les bilans massiques il n'y aura qu'une longueur de fibre et du TiO_2 comme pigment. Il est impossible d'obtenir une distribution de fibres mélangées avec du titane dans un analyseur. Il faut assumer que cette variable n'est pas reliée à la problématique. La concentration des autres pigments dans la pâte reste inconnue. C'est pour cette raison que le titane est associé à la couleur d'autant plus que c'est lui qui donne le pouvoir opacifiant au papier.

3.3 Étapes du projet

L'étude de la problématique sera faite par simulation, plus précisément par bilan de masse. La figure 3.1 résume bien la marche à suivre pour ce genre de travail.

1. *Énoncé du problème*: chaque étude par simulation débute par l'énoncé d'une problématique. Il n'est pas impossible de reformuler le problème tout au long de l'étude. C'est à cette étape qu'on choisit des scénarios hypothétiques qui seront simulés.

L'énoncé du problème a changé de formulation une ou deux fois. Avec tous ces changements de directives imposés par CDM, il reste qu'il fallait optimiser les changements de grade avec une feuille de papier moins large. Il n'y avait qu'un scénario hypothétique à cette étape, soit un changement dans les conduites. Les scénarios de rétention furent suggérés plus tard.

2. *Modèle*: le système réel sera transformé en un modèle conceptuel, une série de relations mathématiques et logiques concernant les composantes et la structure du système. Il est recommandé de commencer par une modélisation simple pour obtenir un modèle avec une complexité appropriée.

La recommandation de commencer par une modélisation simple n'a pas été mise en pratique. Il est impossible de reproduire l'usine dans les moindres détails. Le logiciel a ses limites face à la réalité. L'apprentissage du logiciel, auquel il faut accorder beaucoup de temps, est une autre raison de commencer par une modélisation simple.

Cela étant , chaque module devrait être simulé et optimisé avec ses entrées et sorties. Somme toute, le modèle obtenu dans ce travail a une complexité respectable.

Tous les cuviers sont modélisés comme des réservoirs parfaitement mélangés. Les tamis, les épurateurs, les éléments de la table de formation sont des modules de séparations solide-liquide.

3. *Données:* pour alimenter le modèle une collecte de données à des points stratégiques du procédé sera évidemment primordiale à l'étude de la problématique. Il est suggéré de construire un modèle en effectuant parallèlement une collecte de données.

Certaines données ont été fournies par CDM et d'autres ont été recueillies lors du projet. Les échantillons de pâte ont été analysés au laboratoire pour obtenir la consistance et le taux de cendres. Certains débits étaient connus, d'autres non. Après avoir validé une première fois les débits inconnus avec les modules pompe, un retour aux sources fut jugé pertinent compte tenu du fait que CDM se trouvait en période d'arrêt. Le travail consistait à mesurer le temps de vidange d'un réservoir rempli d'eau.

4. *Translation du modèle :* le modèle conceptuel construit devient alors un modèle opérationnel.

La translation du modèle se fait en quelque sorte en même temps que la modélisation et la l'entrée des données. L'apprentissage du logiciel se fait aussi à cette étape. Comme il a été mentionné auparavant, beaucoup de temps a été mis sur l'apprentissage de CADSIM.

5. *Vérification :* est-ce que le modèle opérationnel performe correctement sur le simulateur , en l'occurrence Cadsim ? Y a-t-il des erreurs de programmation ou d'ordre d'exécution?

En fait plusieurs modèles ont été vérifiés. Pour obtenir un modèle opérationnel il a fallu changer ou éliminer certains modules, comme les modules pompe et vanne. Les contrôleurs de consistance ont été remplacés par des modules de dilution. L'ordre d'exécution a causé quelques problèmes mais sans plus. Il s'agit simplement de mettre les modules dans le bon ordre.

6. *Validation*: On détermine si le modèle conceptuel a une représentation réelle du système. Si c'est nécessaire il est possible à nouveau de faire une collecte de données ou de retourner à la modélisation.

Il faut à chaque point déterminer si on obtient les données mesurées. Cela demande beaucoup de temps. Plusieurs débits étaient inconnus et il était pratiquement impossible d'avoir une reconciliation des données satisfaisante. Quelques débits, où des mesures étaient possibles, ont été trouvés lors d'un arrêt de production. Par la suite, une validation a pu se faire malgré un manque d'information. Une expertise du procédé est primordiale pour estimer les inconnus tel que les débits, les consistances, et les taux de cendres.

7. *Simulations*: Simulation des scénarios hypothétiques en prenant soin de noter tous les résultats susceptibles d'être analysés.

Avant d'analyser les scénarios hypothétiques, la simulation du procédé actuel allait de soi. Un peu avant la fin du projet, CDM a fait le choix des scénarios hypothétiques et la façon de faire l'analyse des résultats. Enfin, de nouvelles hypothèses ont été émises pour simuler les problèmes de CDM.

8. *Résultats*: analyse des résultats sous forme de graphique ou tableau.

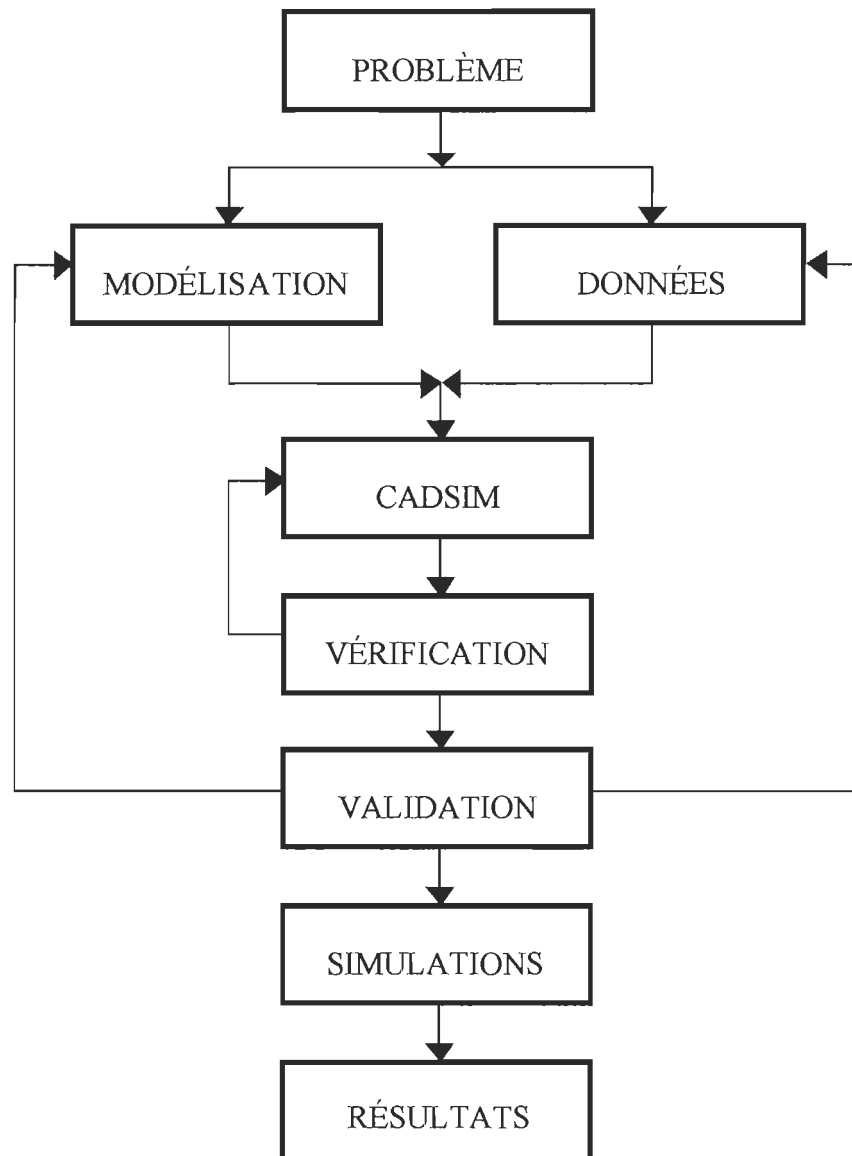


Figure 3.1 Étapes d'une étude par simulation

Chapitre 4 - Résultats

Les résultats des simulations (scénarios) de la partie constante de la machine à papier de CDM Papier Décor sont représentés sous forme de diagramme d'écoulement dans les sections 4.1.2, 4.1.4 et 4.1.3. Les trois chiffres sur les diagrammes d'écoulement sont respectivement : le débit (L/min), la consistance (%) et le taux de cendres (%). Les chiffres en italique sont les données recueillies.

4.1 Dynamique d'un changement de grade

Dans les prochaines sections, tous les graphiques représentent la variation du taux de cendres en fonction du temps. La figure 4.1 décrit le comportement d'un ajustement de couleur, i.e. l'alimentation du cuvier-machine et le taux de cendres en fonction du temps. Le but étant d'expliquer la courbe sur toute sa longueur, cet aspect ne sera vu qu'une fois.

Au temps 0, la largeur de la feuille est diminuée à 8 pouces pour permettre un changement de grade. A ce moment, le taux de cendres de la feuille diminue drastiquement dû au faible débit sur la toile. L'entrée de pâte fraîche, la moins chargée en titane, passe par zéro avant d'atteindre un équilibre intermédiaire. Le débit de cassés, plus chargés en titane, atteint une valeur maximale, valeur à laquelle le taux de cendres est le plus élevé.

Dans la zone linéaire, il n'y a pratiquement pas de pâte fraîche qui entre dans le système. Le quantité de titane ajouté ne suffit pas à combler les pertes, donc le taux de cendres diminue. C'est cette partie qui sera traitée dans l'analyse des résultats.

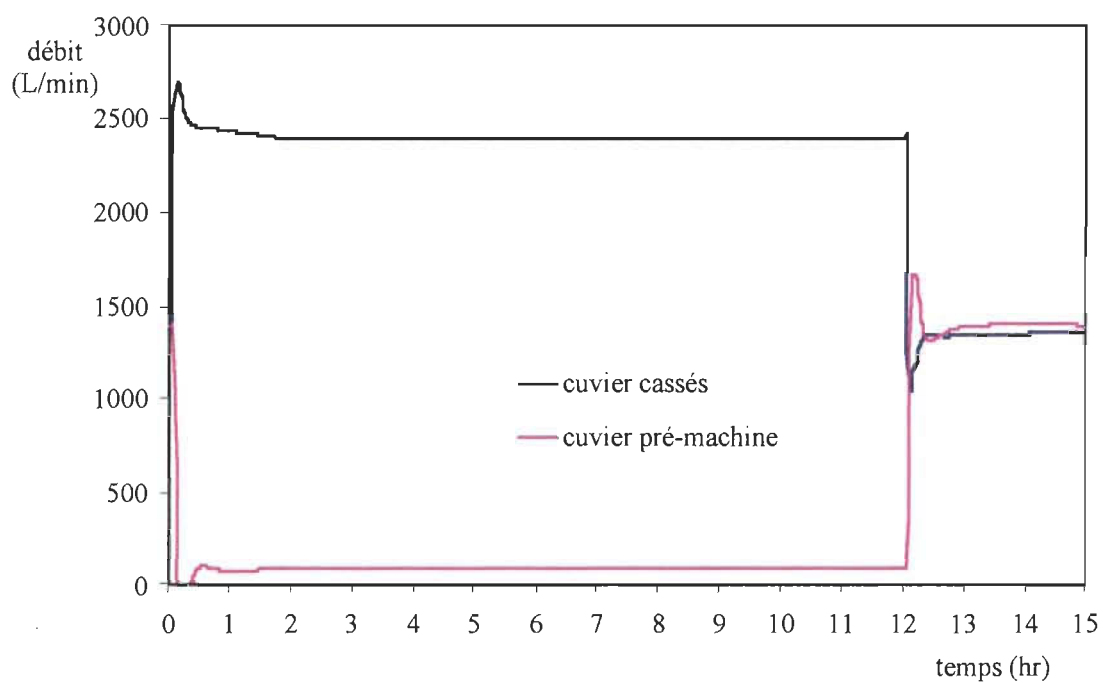
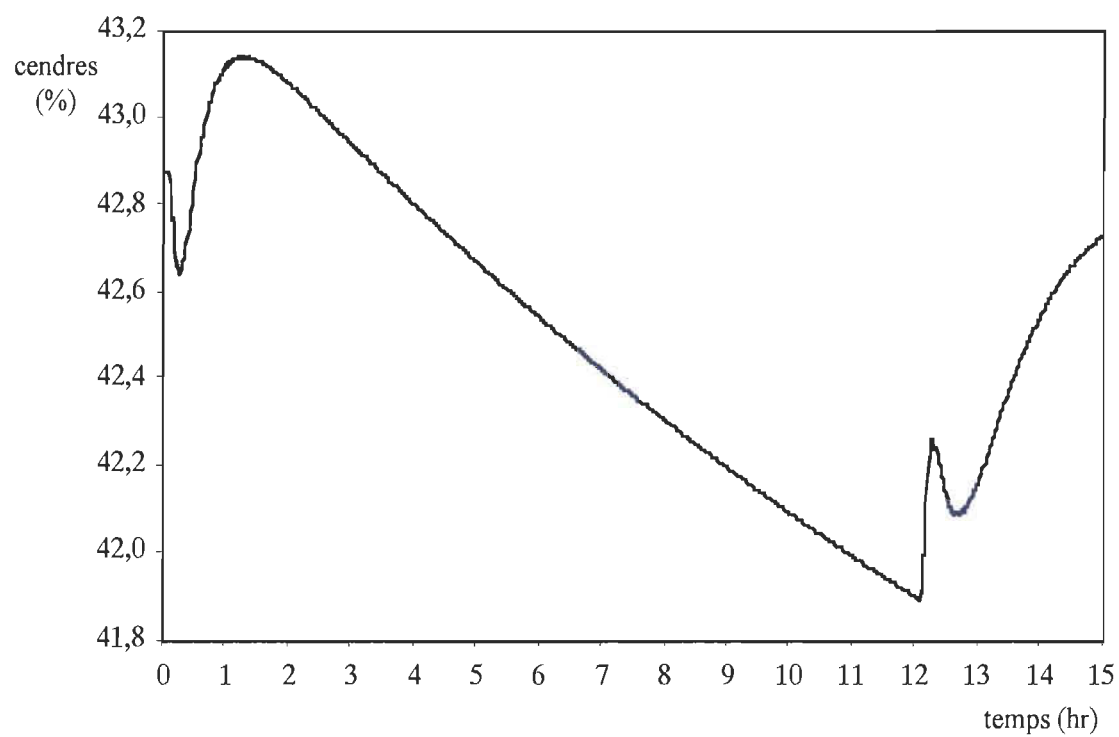


Figure 4.1 Cendres et débit en fonction du temps

Le changement de grade terminé, la feuille est repassée. Le taux de cendres augmente rapidement dû au débit élevé sur la toile, redescend à cause d'une augmentation soudaine du débit de pâte fraîche et remonte jusqu'au régime permanent.

En résumé, quand il y a des perturbations au cuvier-machine, il y a aussi des variations du taux de cendres.

4.1.1 Simulation du procédé actuel

La première étape consiste à simuler et valider le procédé actuel durant un ajustement de couleur, figure 4.2.

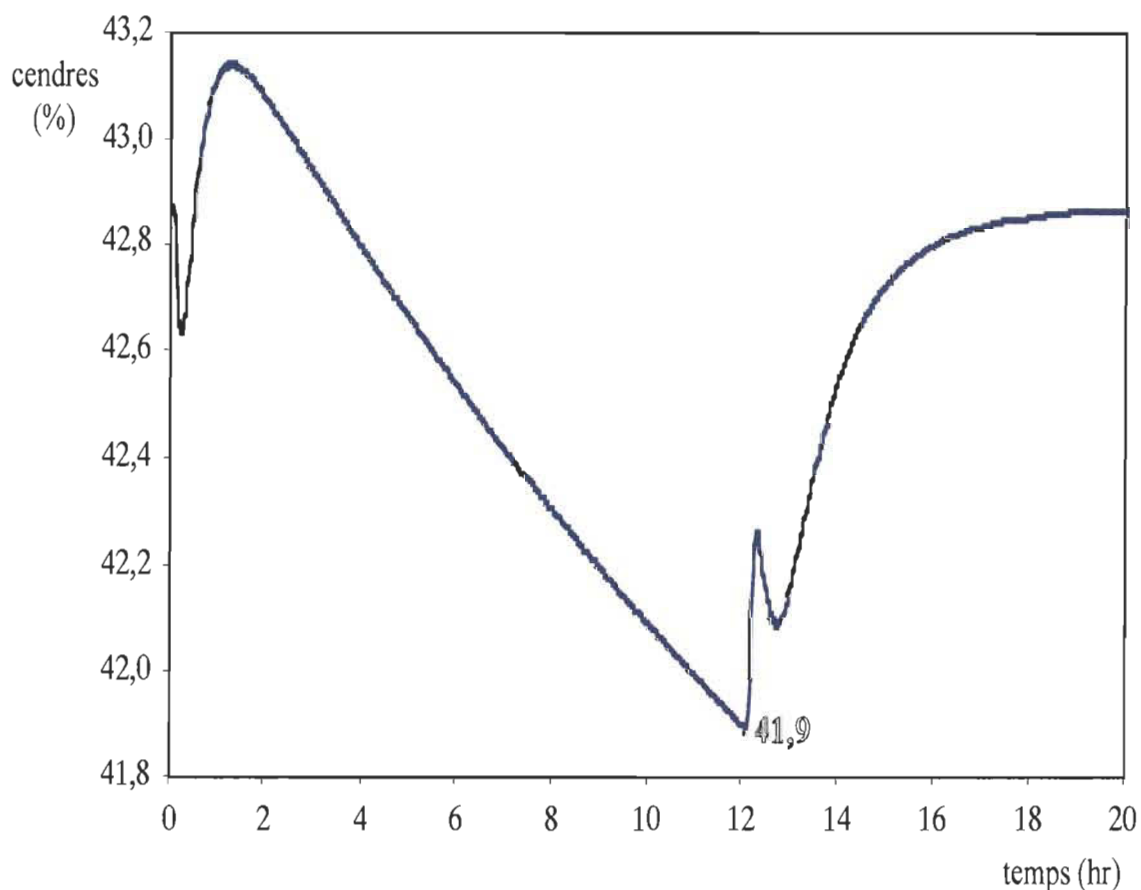


Figure 4.2 Simulation du procédé actuel

Pour cette figure on remarque qu'il semble possible de faire un changement de grade d'une durée de 12 heures avec une feuille de 8 pouces de large car le taux de cendres ne diminue pas plus de 1%. Il a été dit que pour qu'une variation de couleur soit remarquée, le taux de cendres devait varier de plus de 1%. Or, l'expérience de CDM dans les changements de grade avec des correctifs de couleur importants, nous indique qu'il est impossible d'effectuer un changement de couleur dans ces conditions. La simulation du procédé réel n'est donc pas validée. Pour pouvoir poursuivre cette étude, il faut donc réévaluer les pertes de cendres dans le procédé.

4.1.2 Évaluation des pertes

Pour reproduire plus fidèlement le procédé, l'hypothèse d'augmenter les pertes de titane semblait être une solution représentative. C'est le titane qui donne le taux de cendres dans le papier. Plus il y a du titane dans la feuille, plus le taux de cendres est élevé. Le taux de cendres est le rapport de titane sur la quantité totale de fibre et de titane. L'évaluation des pertes consiste à déterminer la quantité de titane à perdre pour se rapprocher de la réalité.

La figure 4.3 montre, lors d'un changement de grade avec une feuille moins large, qu'une augmentation des pertes en titane dans le procédé diminue considérablement le taux de cendres dans le papier. Les résultats simulés sont représentés sur un diagramme d'écoulement, figure 4.4.

Pendant les changements de grade, CDM constate une perte de couleur, donc une perte de titane. Ce résultat se rapproche donc de la « perte de couleur » que CDM avait l'habitude de vivre pendant un changement de grade avec une feuille moins large.

Le tableau 4.1 résume les pertes totales en titane. Dans un premier temps, l'estimation 1 (P1 et P2 sur le diagramme d'écoulement) est la perte en titane qui a servi à faire la première simulation. Et l'estimation 2 (P3 et P4 sur le diagramme d'écoulement), est l'augmentation de la perte en titane hypothétique pour se rapprocher de la réalité. À noter

que les endroits où le titane est perdu n'est pas important. La somme des deux estimations représentent les pertes totales en titane.

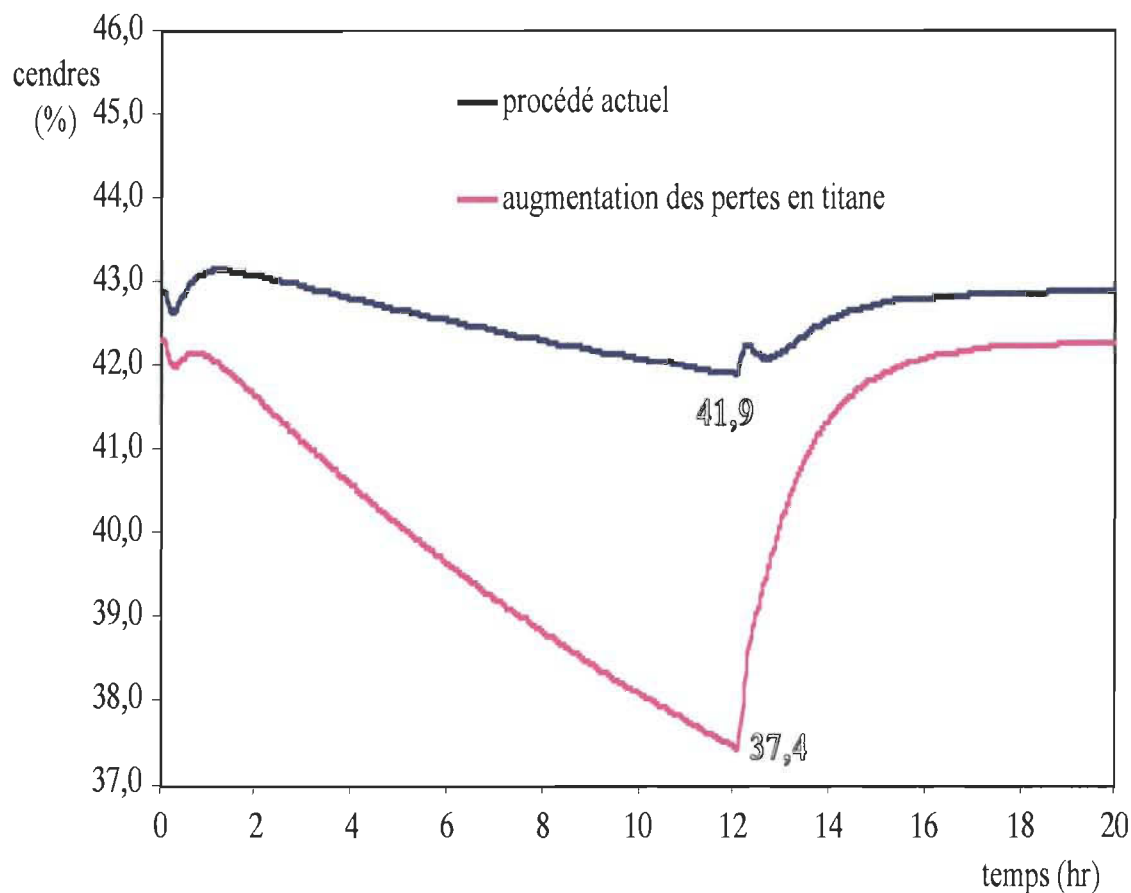


Figure 4.3 Évaluation des pertes

Tableau 4.1 Pertes totales en titane

PERTES (t/j)	ESTIMATION 1 (t/j)	ESTIMATION 2 (t/j)
épurateur tertiaire (P2)	0.0785	
tamis tertiaire (P1)	0.3555	
autres pertes (P3 et P4)		1.001
PERTES TOTALES	1.435	

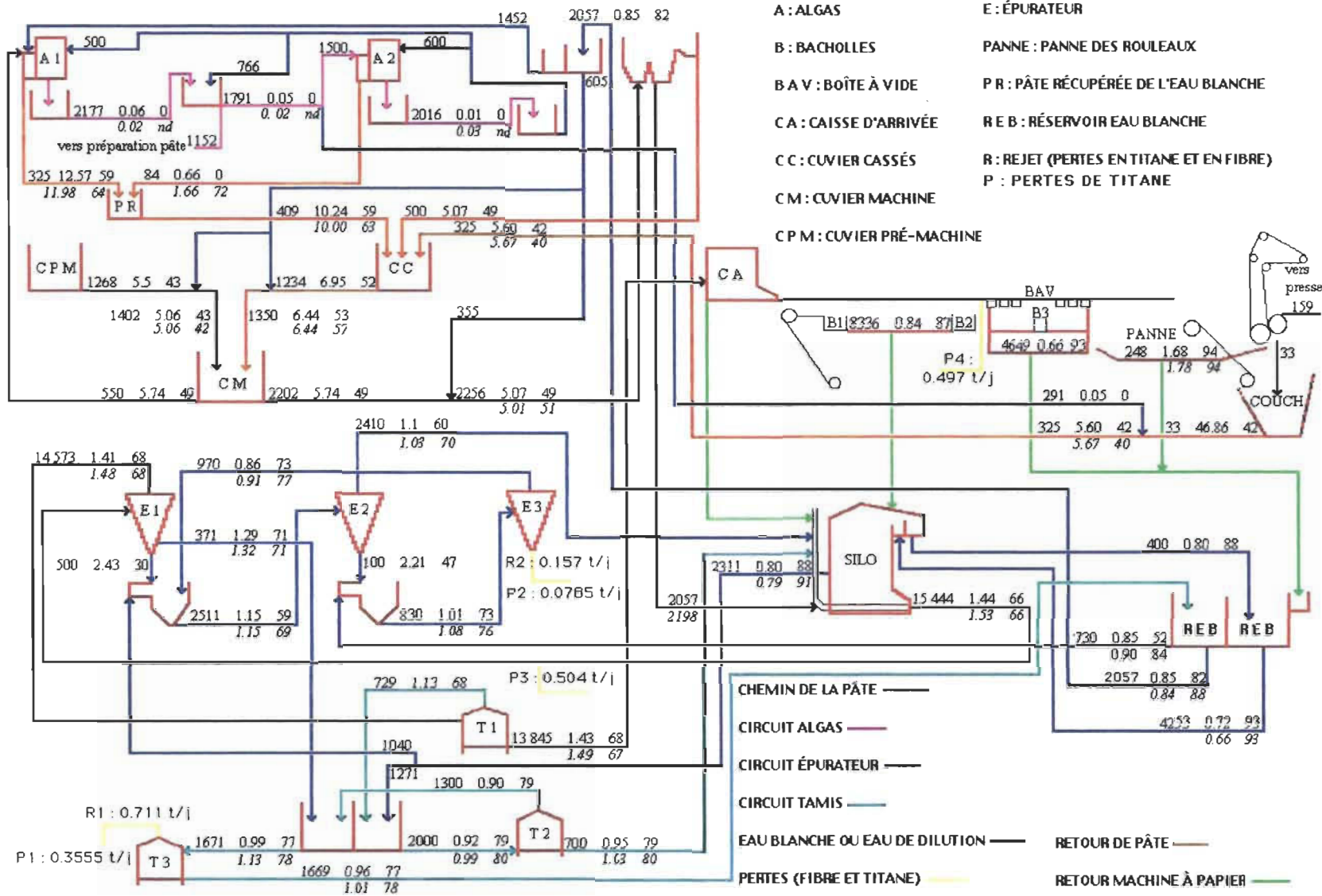


Figure 4.4 Diagramme d'écoulement évaluation des pertes

4.1.3 Scénario 1 : Pâte de l'eau blanche au silo

Une fois les pertes réévaluées, le scénario 1 est simulé , figure 4.5. Dans ce scénario, la pâte récupérée de l'eau blanche est envoyée au silo. Les résultats simulés se retrouvent sur la figure 4.6. La pâte qui est récupérée de l'eau blanche a une teneur élevée de cendres , et est donc plus foncée. Il faut retourner cette pâte le plus rapidement possible sur la toile de formation pour limiter les variations de la qualité de pâte au cuvier machine.

Même si l'alimentation du cuvier machine est plus homogène , il y a plus de pertes à l'épurateur tertiaire , ce qui fait que nous disposons de moins de temps (temps alloué) pour faire un ajustement de couleur, tableau 4.2. Le but étant d'augmenter le temps alloué pour faire un changement de grade avec une bande de papier de 8 pouces, le scénario 1 est rejeté. Le temps alloué est le temps disponible pour faire un changement de grade sans perdre la couleur.

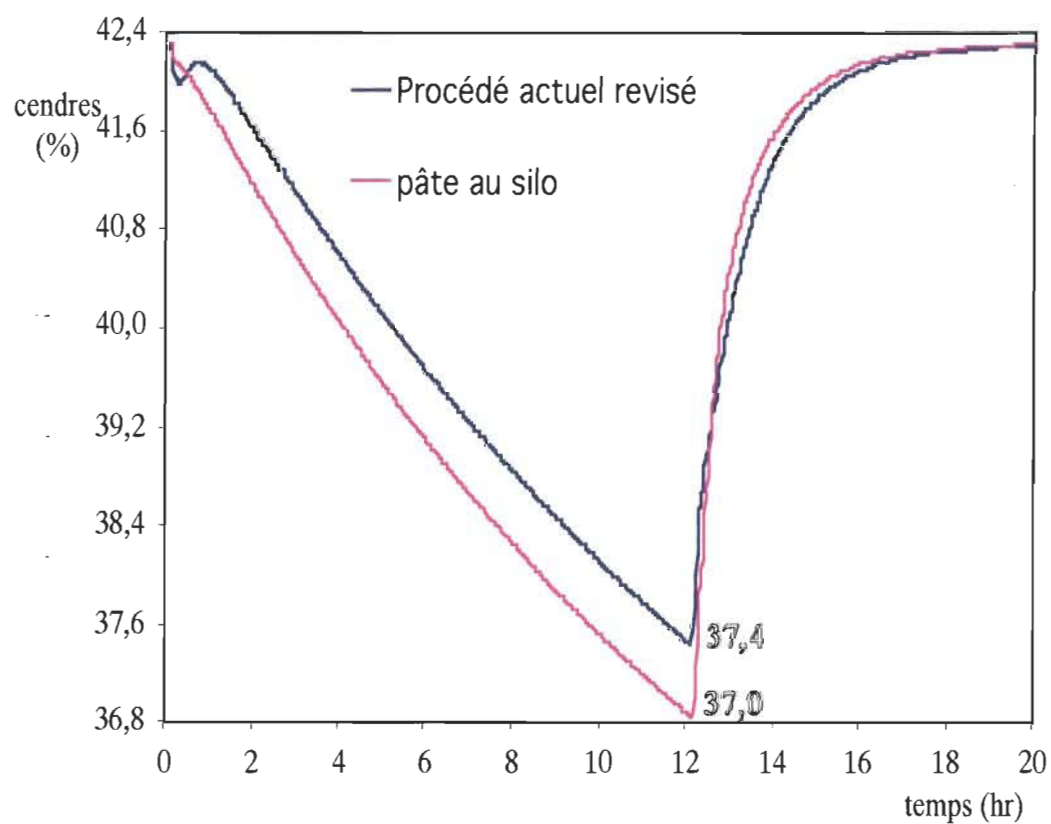
4.1.4 Scénario 2 : Augmentation de la rétention

Le deuxième scénario consiste à augmenter la rétention du titane et des fibres sur la toile de formation, figure 4.7. Les diagrammes d'écoulement simulés sont présentés aux figures 4.8, 4.9, 4.10.

Avec une meilleure rétention des fibres et de titane, il y a moins de pertes de ces deux composés dans le procédé (R1, R2, P3 et P4 sur les diagrammes d'écoulement) et le temps alloué pour faire des corrections de couleur augmente, tableau 4.3. On ne peut pratiquement pas obtenir la valeur maximale de rétention, mais avec un bon programme de rétention, nous pouvons facilement atteindre des valeurs entre 70% et 85% . Par contre, il est nécessaire que les coûts engendrés par un tel programme soient inférieurs aux économies réalisées.

Tableau 4.2 Pâte au silo

	PROCÉDÉ ACTUEL REVISÉ	PÂTE AU SILO
TEMPS ALLOUÉ (hr)	2.55	1.73
QUALITÉ DE LA PÂTE	CUVIER PRÉ-MACHINE	CUVIER CASSÉS
consistance (%)	5.06	5.28
cendres (%)	43	43

**Figure 4.5 Scénario 1 : Pâte de l'eau blanche au silo**

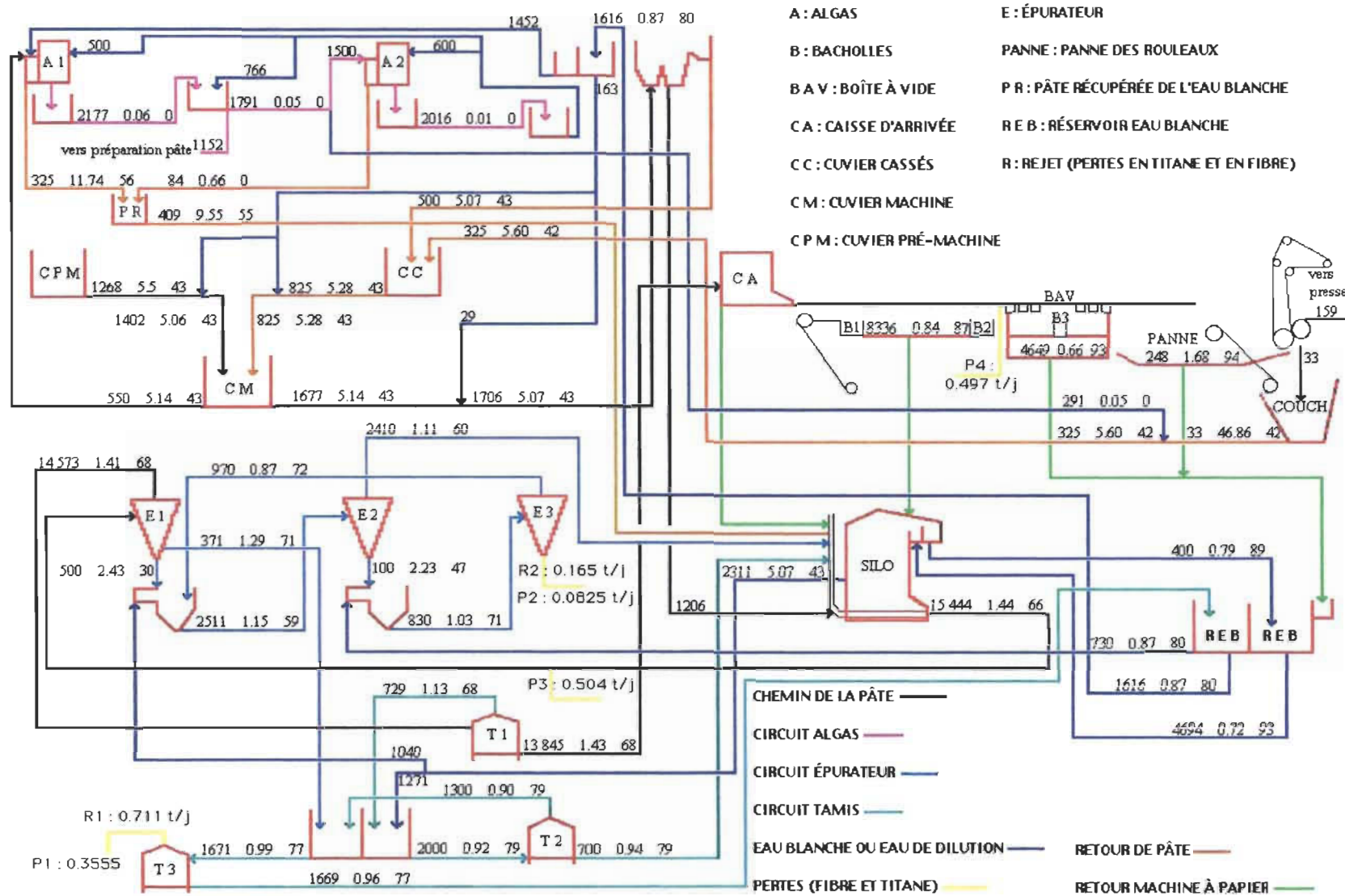


Figure 4.6 Diagramme d'écoulement pâte au silo

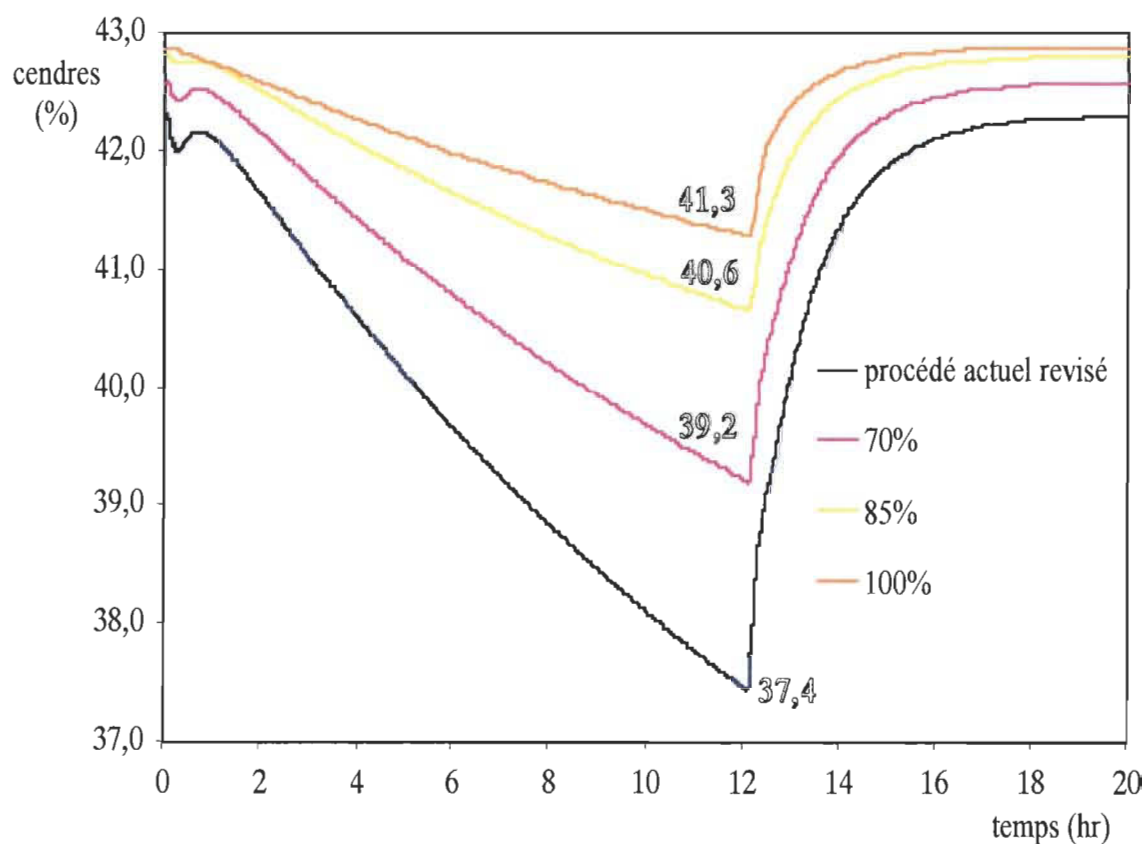
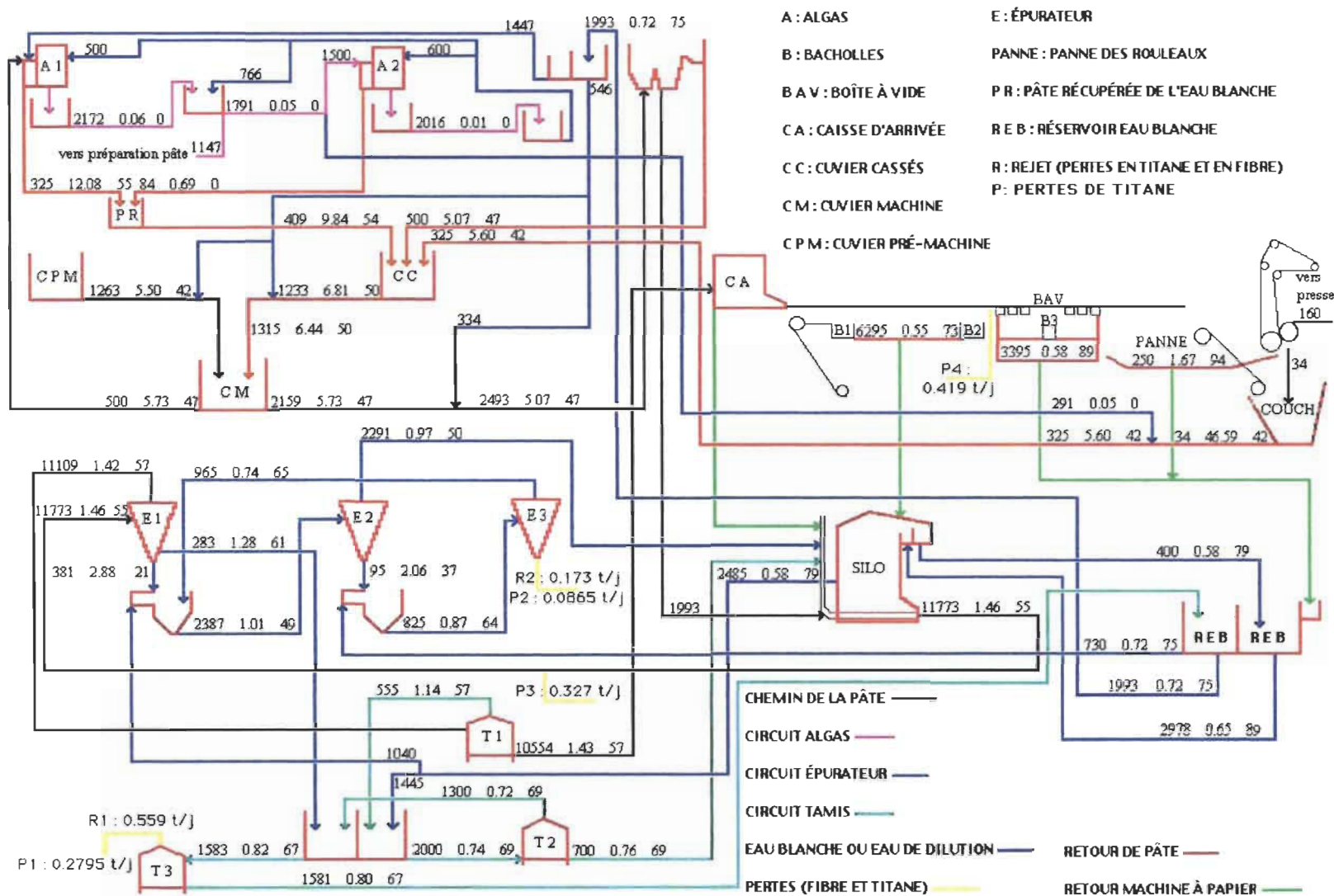


Figure 4.7 Scénario 2 : Augmentation de la rétention

Tableau 4.3 Rétention

	PROCÉDÉ ACTUEL REVISÉ	70%	85%	100%
TEMPS ALLOUÉ (hr)	2.55	3.62	4.88	6.1
PERTES (R1 + R2 + P3 + P4) (t/j)	1.869	1.478	0.842	0.466
ÉCONOMIES (M/an)	0	0.46	0.49	0.79



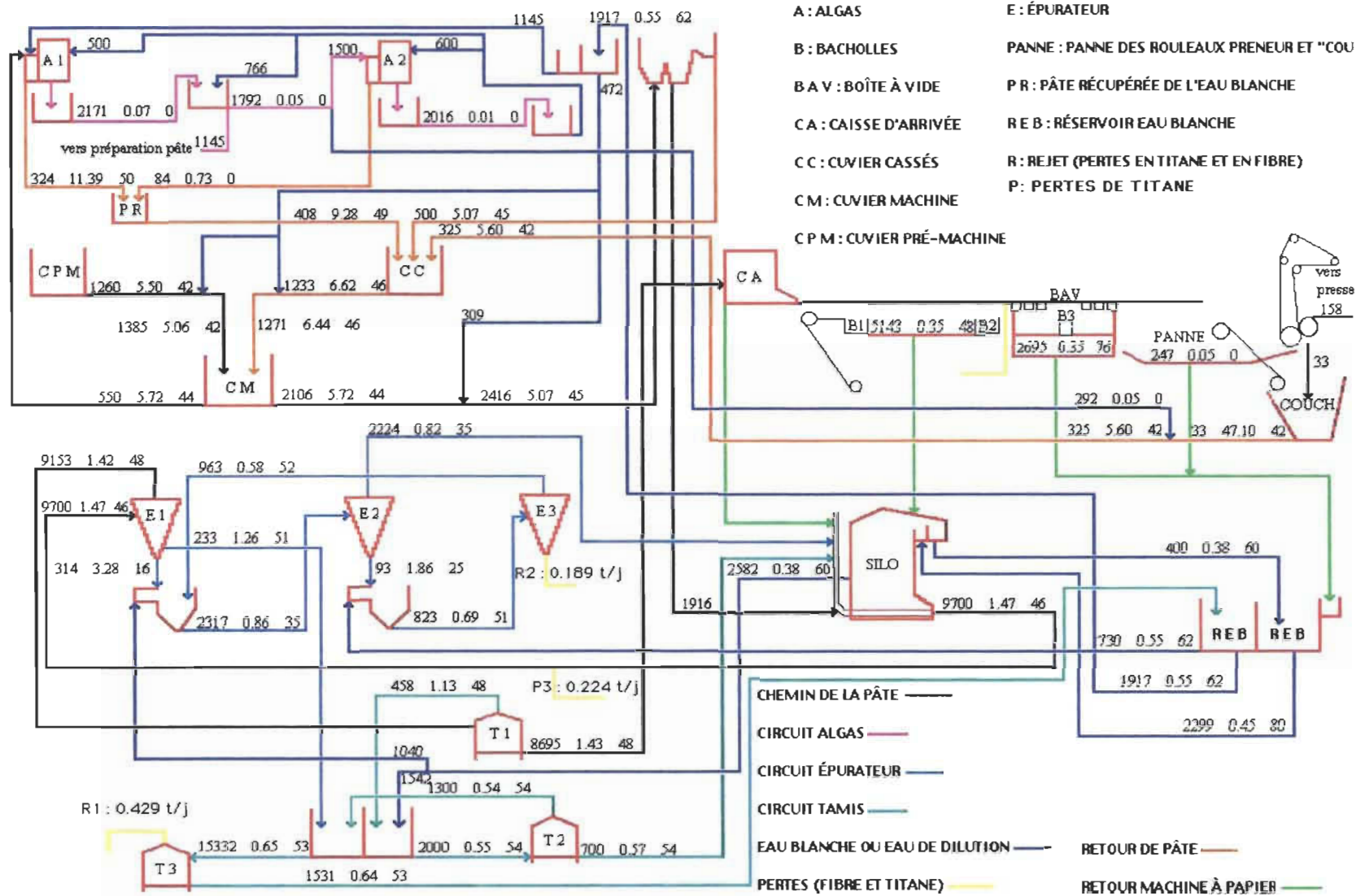


Figure 4.9 Diagramme d'écoulement 85% de rétention

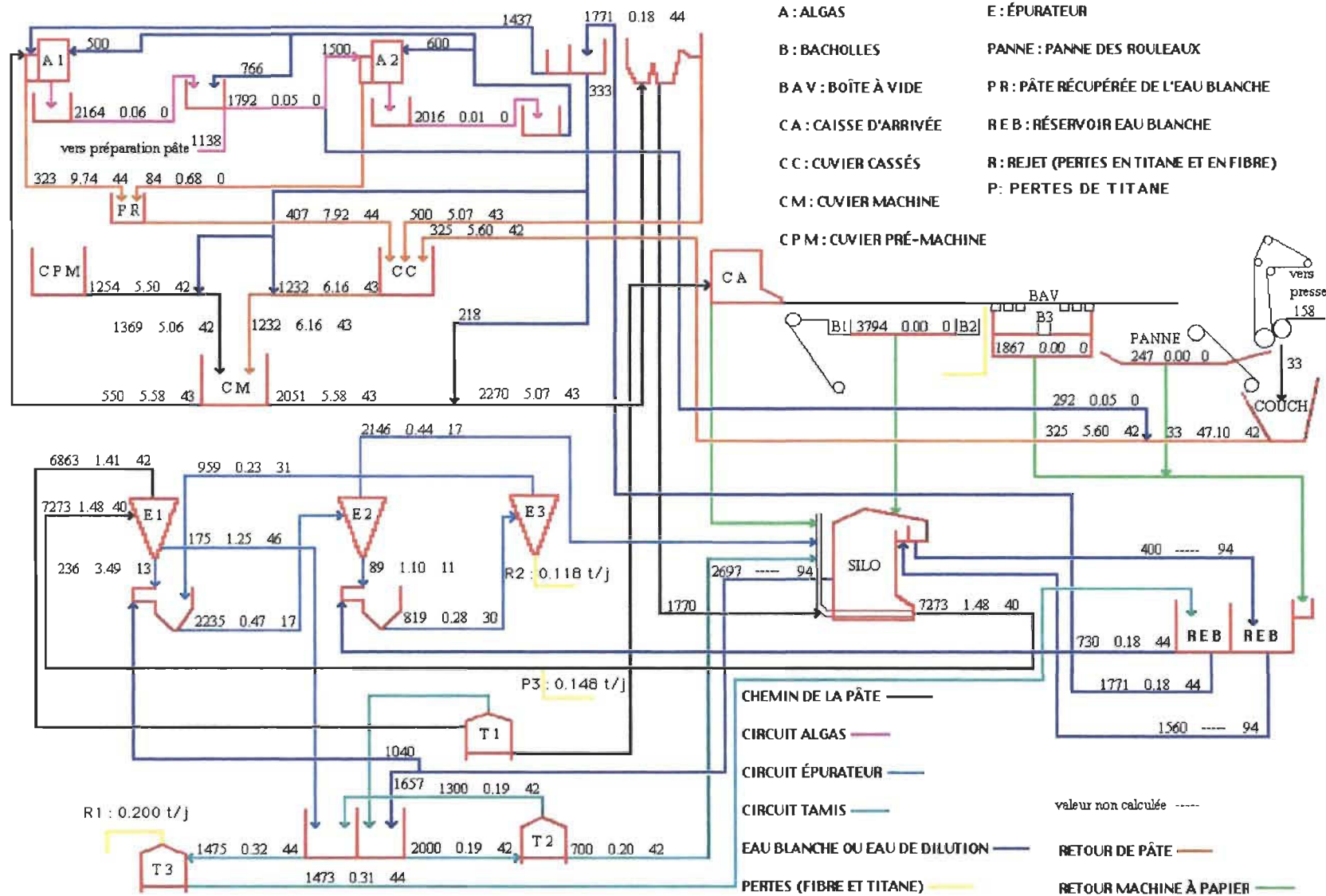


Figure 4.10 Diagramme d'écoulement 100% de rétention

Chapitre 5 - Conclusion

5.1 Recommandations

Le procédé de CDM papier décor a été modélisé et simulé pour étudier le temps de stabilisation de la partie constante de la machine à papier décor. D'après une première simulation, un changement de grade de 12 heures avec une bande de 8 pouces de large semble possible avec le procédé actuel. Or, l'expérience de CDM dans les changements de grade avec des correctifs de couleur importants, nous indique qu'il est impossible d'effectuer un changement de couleur dans ces conditions, ce qui invalide la simulation. Pour refléter la problématique de CDM, qui est la « perte de la couleur », une réévaluation des pertes en titane s'avérerait une solution envisageable. Si le taux de cendres est relié à la couleur, il faut donc par analogie perdre des cendres, donc du titane. Une estimation de 1.001 t/j de titane s'est ajouté aux pertes totales de titane.

Ensuite, deux scénarios hypothétiques se sont ajoutés aux simulations. Dans le premier scénario, la pâte récupérée de l'eau blanche a été envoyée au silo. Même si l'alimentation du cuvier machine est plus homogène, il y a plus de pertes et nous disposons de moins de temps pour faire un ajustement de couleur avant la perte de cette dernière.

Dans le deuxième scénario, la rétention a été augmentée. Plus la rétention augmente, plus l'alimentation au cuvier machine devient homogène. Il y a aussi moins de pertes, donc plus de temps pour faire un changement de grade. Mais pour que la rétention soit une solution intéressante, il faut que les coûts du programme de rétention soient pratiquement nuls. Ce qui veut dire des économies de 0.47 M/an s'il est possible de retenir entre 70% et 85% de titane sur la toile de formation.

En résumé, les scénarios sont rejetés et le procédé demeure inchangé. Dans le futur, il sera nécessaire d'élaborer des méthodes d'échantillonnages pour mesurer la couleur dans

la pâte en régime permanent et pendant un changement de grade. Des méthodes d'analyses au laboratoire devront être implantées. Ceci permettra de comprendre, d'un bout à l'autre du procédé, le comportement de la couleur. Par la suite, il sera possible de construire un nouveau modèle qui comportera des relations mathématiques pouvant être reliées à la couleur. Avant de construire le modèle il est recommandé de prendre des mesures sur plusieurs grades.

5.2 Couleur VS cendres

On a vu par bilan de masse que le taux de cendres diminuait considérablement pendant un changement de grade. Une explication simple : il se perd plus de titane qu'il en entre. Mais est-ce vraiment 1.435 t/j qui est perdu ? Il a fallu choisir une valeur qui pouvait refléter les expériences passées sur la « perte de couleur ». Les colorants chimiques qui sont ajoutés, même en petite quantité, provoquent sûrement des réactions physico-chimiques dans la pâte. C'est donc plus qu'un bilan de masse. Le taux de cendres pourrait être considéré comme une double variable: il a un effet sur l'opacité (effet visuel) et peut être suivi par bilan de masse.

5.3 À retenir

Pour connaître du succès lors d'une étude par simulation il est primordial de bien formuler la problématique. Il faut toujours avoir le but et les objectifs précis en tête pour trouver la bonne solution aux bonnes questions, et ne pas attendre d'apporter des corrections ou d'évaluer la rigueur de l'information ramassée.

Pour arriver à bien se concentrer sur la problématique, on commence par un modèle simple, on rajoute des détails au fur et à mesure. On peut formuler des hypothèses lors de la construction du modèle, le but n'est pas d'obtenir un modèle sophistiqué ou trop complexe. Finalement, se poser des questions sur les sorties. En d'autres mots, porter une attention particulière au non-sens.

Bibliographie

- 1 Deschamps, P., "*CDM Laminés Nears Start-up of Drummondville Decor Paper Plan*", Pulp and Paper Journal (1991).
- 2 Jamieson, S., "*CDM Laminés Inc. Launches A World First* ", Pulp and Paper Canada 93 (3): 11-12 (1992)
- 3 Compagnie CDM, "*Module de formation machine* ", CDM Laminés Inc. (1991).
- 4 Compagnie CDM, "*Chefopérateur* ", CDM Laminés Inc., Révision (1996).
- 5 Banks, J., "*Handbook of Simulation*", John Wiley, New York , USA (1998).
- 6 Piipponen, J., "*KCL-PROPOSE-A new Simulation and Optimization System for PaperMachines*" , Paperi Ja Puu – Paper and Timber 78 (6): 382-385 (1996).
- 7 Graeser, H.J., Marcev Jr., C.L., E.L. E.I. Dupont, Waite, A.W.R., Bialkowski, W.L., "*A High-Fidelity Dynamic Simulator as a Life-Cycle Design Tool. Control System*" : 195-197 (1996).
- 8 Berreth, P., Nelson, D., "*Utilizing Advanced Tools To Create A First Principles simulator For Operator Training And Control System Checkout*", Process Control Symposium : 77-81 (1994).
- 9 Storck, A., Grevillot, G., "*Génie des procédés*", Techniques et Documentation-Lavoisier(1993).
- 10 Powell, R. E., "*Software for process analysis*", Engineering Conference: 617-619 (1996).

-
- 11 Cole, D., Farmin, D., Euhus, L., "*Using Simulation to Identify and Evaluate Operating Cost Savings by Recovering Waste Heat*", Compte rendu sur Cédérom de TAPPI ENGINEERING ATLANTA (2000).
 - 12 Jacob, J., Vivant, C., Houle, J.F., "*Analyse et optimisation des réseaux d'eau des procédés papetiers*" 84th Annual Meeting, Technical Section CPPA: B315-B318
 - 13 Laperrière, L., Wasik, L., "*Implementation of a Neural Network Modeling Module in a Simulation Software Package*" , Compte rendu sur Cédérom de TAPPI ENGINEERING ATLANTA (2000).
 - 14 Wilson, P.H., Wasik, L.S., Herschmiller, D.W., "*Case Studies of Process Simulation in engineering*", Tappi Journal 67 (2): 78-81 (1984).
 - 15 Kelleher, E.G., "*Computer Simulation in the U.S. Pulp and Paper Industry*", Tappi Journal: 45-47 (1986).
 - 16 Glasscock, D.A., Hale, J.C., "*Process Simulation: The Art and Science of Modeling*" Chemical Engineering: 82-89 (1994).
 - 17 Salomone, H.E., Montagna, J.M., Iribarren, O.A., "*Dynamic Simulations in the Design of Batch Processes*", Computers Chemical Engineering 18 (3): 191-204 (1994).
 - 18 Doshi, M. R., Chang, N. L., Dyer, J.M., Walraven, J., Walch, J.R., "*Computer Simulation of a Secondary Fiber Stock Preparation System*", Tappi journal 67 (9): 120-123 (1984).
 - 19 Bryant, P.S., Samuelson, A., Basta, J., "*Minimizing BaSO₄ Scale Formation in ECF Bleach Plants*", Minimum Effluent Mills Symposium Proceedings, TAPPI (1997).

-
- 20 Minday, A.M., Burke, M.A., Reid, D.W., Brown, G.J., "*An Overview of Various Strategies for Balancing Salt Cake, Chloride, and Potassium Levels in an ECF Kraft Mill*", International Chemical Recovery Conference (1998).
 - 21 Scheldorf, J.J., Edwards, L.L., "*Challenges in Modelling the RDH Process: a Discontinuous Dynamic System*", Tappi Journal 76 (11): 97-104 (1993).
 - 22 Jones, G.L., Koepke, S.A., "*Simulation of Dynamic and Control of a Two-Ply Paper Machine*", Tappi Journal 77 (8): 111-120 (1994).
 - 23 Elkadiri, M.E., Berrada, M., "*The Wet-End in Pulp and Paper Industry : Controllers and Simulation Results*", IEEE : 97-100 (1997).
 - 24 Miyanishi, T., Iida, K., Iwatsu, T., "*Dynamic Simulation for Efficient Paper Machine Grade Change*", Tappi Journal: 49-55 (1988).
 - 25 Välisuo, H., Niemenmaa, A., Lappalainen, J., Laukkanen, I., Juslin, K., "*Dynamic Simulation of Paper and Board Mills : A Case Study of an Advanced Grade Change Method*", Engineering Conference: 491-498 (1996).
 - 26 Jones, G.L., Petäjä, P.H., "*Optimization of Linerboard Properties Through Performance Attribute Modeling and Simulation of a Two-Ply Papermachine*", Tappi Proceedings Papermakers Conference: 275-290 (1994).
 - 27 Jones, G.L., "*Simulation the Development of Pulp and Paper Properties in Mechanical Pulping Systems*", Pulp and Paper Canada 89 (6): T214-T222 (1988).
 - 28 Bussi eres, S., Roche, A., Paris, J., "*Analysis and Control of White Water Network Perturbations in an Integrated Newsprint Mill*", Pulp and Paper Canada 93 (4): T97-T100 (1992).

-
- 29 Croteau, A.P., Roche, A.A., "*Study of Broke Handling and White Water Management Using a Dynamic Simulation*", Pulp and Paper Canada 88 (11): T420-T423 (1987).
- 30 "*Introduction to Process Simulation*", TAPPI PRESS (1992)
- 31 Hillestad M., Hertzberg, T., "*Dynamic Simulation of Chemical Engineering Systems by the Sequential Modular Approach*" Computer & Chemical Engineering 10 (4) : 277-388 (1986).
- 32 Donat, V., Paris, J., Van De Ven, T.G.M., "*Simulation of a Paper Machine Twin-Wire Forming Section*", Journal of Pulp and Paper Science 26 (8): 284-288 (2000).
- 33 Yap, E.F., Ezra K., Dumont, G.A., "*Dynamic Simulation and Control of a Paper Machine Wet End*", The Canadian journal of chemical engineering 79: 296-302 (2001).
- 34 J.A. Orcotoma, J. Paris, M. Perrier. Dynamic analysis of fibrous material and dissolved solids distribution in the wet-end of a newsprint mill. Appita Journal Vol.52 No. 2 Mars 1999 pp. 105-113
- 35 Orcotoma, J.A., Paris, J., Perrier, M., Roche, A.A., "*Dynamics of White Water Networks During Web Breaks*", Tappi journal 80 (12): 75,101-110 (1997).
- 36 Rousseau, S., "*Using a Dynamic Simulator to Achieve Zero Effluent*", Pima's Papermaker: 45-48 (1997).
- 37 Melton, A., "*Process Simulation as a Tool for Closing Water Loops*", Cost Conference Towards Zero Liquid Effluent Madrid (1999).

-
- 38 Paris, J., "*A System Approach to System Closure in Integrated Newsprint Mills*", International Environmental Conference & Exhibit: 267-279 (1998).
- 39 Paris, J., Dorica, J., Francis, D.W., Orcotoma, J.A., "*System Closure in Integrated Newsprint Mills: R&D Issues*", 84th Annual Meeting, Technical Section CPPA: A281-A285
- 40 Asselman, T., Paris, J., "*Fermeture de circuits d'eau de procédé dans une usine intégrée de fabrication de papier journal : recyclage des effluents du procédé et du biotraitement*", Revue A.T.I.P. 52 (1): 34-40 (1998).
- 41 Houle, J.F., Brousseau, Y., Dorica, J., Paris, J., "*Reduction of Fresh Water Consumption for Process and Non Process Uses in an Integrated Newsprint Mill*", 84th Annual Meeting Technical Section CPPA: A373-A377
- 42 Houle, J.F., Peters, F., Lacroix, F., Paris, J., "*Analyse des impacts thermiques de la recirculation d'eaux dans une usine de papier journal*", Conférence technologique estivale: 89-92 (1997).
- 43 Noël, A., Paris, J., Roche, A., "*Simulation of White Water Management Strategies for an Integrated Newsprint Mill*" Pulp and Paper Canada 94 (11): T383-T386 (1993).
- 44 Passas, R., Roux, J.C., Delpech, F., Carre, B., "*Simulation d'une unité de désencrage*", A.T.I.P. 50 (6): 238-244 (1996).
- 45 Gu, Y., Edwards, L., Haynes J.B., Euhu, L.E., "*Application of Modular Computer Simulation for VOC Prediction in Development of Pulp and Paper Mill Closure Technology*", Tappi Journal 81 (2): 173- 176 (1998)

-
- 46 Casavant, T.E., Côté, R.P., "Chemical Process Simulation : *Helping the Pulp and Paper Industry to Find its Niche in an Industrial Ecosystem*", Compte rendu sur Cédérom de TAPPI ENGINEERING ATLANTA (2000).